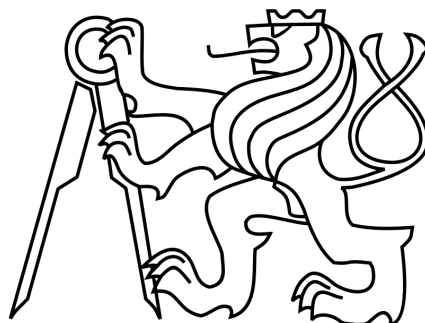


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



Napět'ové zkoušky izolátorů za mokra

Voltage tests of insulators under wet condition

Bakalářská práce

BACHELOR'S THESIS

LUBOMÍR VALENTA

Vedoucí bakalářské práce: ING. RADEK PROCHÁZKA, PH.D

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Lubomír Valenta**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Napětíové zkoušky izolátorů za mokra**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor konstrukce izolátorových závěsů a dopady znečištění na jejich elektrické vlastnosti.
- 2) Popis napětíových zkoušek izolátorů za mokra.
- 3) Návrh a realizace pracoviště pro zkoušky za mokra v Laboratoři vysokých napětí ČVUT - FEL.

Seznam odborné literatury:

- [1] Kuffel, J., Zaengl W.S., Kuffel E.: High Voltage Engineering: Fundamentals, Newnes, 2000
- [2] ČSN IEC 60060-1 : Technika zkoušek vysokým napětím
- Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky

Vedoucí: Ing. Radek Procházka, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 5. května 2015

.....

Lubomír Valenta

ANOTACE: Tato práce se zabývá ve své první části teoretickým úvodem do problematiky izolátorů pro hladiny vysokého, velmi vysokého a zvláště vysokého napětí a jejich provozem. V druhé části se práce věnuje znečištění izolátorů včetně jeho měření a možnostmi jeho zmírnění. Ve třetí části jsou uvedeny zkušební postupy, které prověřují elektrické vlastnosti izolátorů dle platných norem. Čtvrtá a poslední část práce se zabývá návrhem zařízení, které by mohlo být využíváno při vysokonapětových zkouškách za mokra a bylo schopno simulovat ztížené pracovní podmínky izolátoru, konkrétně déšť.

KLÍČOVÁ SLOVA: izolátor, vysokonapětové zkoušky, zkoušky za mokra, znečištění, simulátor deště

ABSTRACT: This work deals in the first part with introduction into theory of the insulators used for high voltage, very high voltage and extra high voltage, and their operation and performance in pollution conditions. The second part deals with the influence of pollution on the insulators, measure methods of the pollution and cleaning methods of the insulators. The third part deals with test methods of insulators, which are used to test the insulators according to relevant norms. The last part deals with the concept of the device, which is able to simulate stressful operating conditions, especially rain.

KEYWORDS: insulator, high voltage tests, wet condition, pollution, rainfall simulator

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Radku Procházkovi, Ph.D. za ochotu, cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

1. ÚVOD.....	11
2. IZOLÁTORŮ.....	12
2.1. Parametry izolátorů.....	12
2.2. Rozdělení izolátorů.....	15
2.2.1. Rozdělení podle použitého materiálu.....	15
2.2.2. Rozdělení podle typu izolátoru.....	18
2.2.3. Rozdělení podle umístění.....	20
3. ZNEČIŠTĚNÍ IZOLÁTORŮ.....	22
3.1. Rozdělení prostředí podle způsobu znečištění.....	22
3.2. Usazování nečistot.....	23
3.3. Parametry určující usazované nečistoty.....	23
3.4. Vliv teploty.....	26
3.5. Měření míry znečištění ovzduší.....	26
3.5.1. Stupně znečištění.....	26
3.5.2. Metodika vyhodnocování spadu.....	28
3.5.3. Metodika podle IEC 60815-1.....	29
3.6. Čištění izolátorů.....	33
3.6.1. Přirozené čištění.....	33
3.6.2. Umělé čištění.....	34
4. NAPĚŤOVÉ ZKOUŠKY IZOLÁTORŮ.....	36
4.1. Zkoušky střídavým napětím.....	36
4.1.1. Zkoušky výdržným napětím.....	37
4.1.2. Zkoušky (zaručeného) napětí průrazného výboje.....	37
4.2. Zkoušky atmosférickým impulzním napětím.....	38
4.2.1. Zkoušky výdržným napětím.....	40
4.3. Zkoušky spínacími impulzy.....	41
4.4. Zkoušky za mokra.....	43
5. ZAŘÍZENÍ PRO ZKOUŠKY ZA MOKRA.....	45
5.1. Požadavky na zařízení.....	45
5.2. Návrh zařízení.....	45
5.2.1. Návrh konstrukce.....	45
5.2.2. Návrh trysek.....	47

5.2.3.	Výpočet přetlaku trysek.....	48
6.	ZÁVĚR.....	51
7.	POUŽITÁ LITERATURA.....	52
8.	PŘÍLOHY.....	54
8.1.	Atmosférické korekce.....	54
8.2.	3D model zařízení.....	57
8.3.	Umístění v laboratoři vysokých napětí.....	60

Seznam použitých veličin a příslušných značek

Tabulka 1: seznam použitých veličin

Veličina	Značka	Jednotka
Činitel tvaru	f	-
Povrchová vzdálenost	L	m
Poloměr	R	M
Rychlost	v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Čas	t	s
Měrná elektrická vodivost	σ	$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$
Délka	l	m
Obsah plochy	S	m^2
Elektrický odpor	R	Ω
Teplota	θ	$^{\circ}\text{C}$
Salinita	S_a	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Hmotnost	m	kg
Napětí	U	V
Proud	I	A
Směrodatná odchylka	s	-
Perioda	T	s
Výška	h	m
Poloměr	r	m
Objem	V	m^3
Objemový průtok	\dot{V}	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Tlak	p	Pa
Korekční činitel	K_t	-

Seznam použitých zkratek

Tabulka 2: seznam použitých zkratek

ESDD	ekvivalentní hustota usazených solí
NSDD	hustota usazených nerozpustných látek

Seznam obrázků

Obrázek 1: naznačení parametrů izolátoru.....	14
Obrázek 2: Řetězec skleněných čapkových izolátorů.....	16
Obrázek 3: Schéma kompozitního tyčového izolátoru s popisky jednotlivých částí.....	17
Obrázek 4: Ukázky různých povrchů s různou schopností odolávat vodě s klasifikací.....	18
Obrázek 5: typy izolátorů.....	20

Obrázek 6: průměrný roční výskyt prachových částic v g/m^2	25
Obrázek 7: klasifikace stupně znečištění podle metodiky vyhodnocení spadu	29
Obrázek 8: rozdělení povrchu izolátoru podle kontrolních intervalů pro měření stupně znečištění	30
Obrázek 9: Vztah mezi ESDD a NSDD pro referenční tyčové izolátory dle metodiky podle IEC 60815-1	33
Obrázek 10: Typický tvar atmosférického impulzu	39
Obrázek 11: Různé tvary useknutého atmosférického impulzu s vyznačenou dobou useknutí	39
Obrázek 12: Typický tvar spínacího impulzu	42
Obrázek 13: Detail upevnění hlavní plachty očky, pohled na rohovou plastovou spojku horizontálních trubek a pohled na podstavec vertikální trubky	46
Obrázek 14: detail výtokové hadice s naznačeným kanálem	47
Obrázek 15: Náčrt situace při výpočtu přetlaku pro trysky	50
Obrázek 16: Kostra zařízení bez plachet se spojkami a podstavci + přívodní hadice s tryskami	57
Obrázek 17: Kostra zařízení s oběma plachtami, naznačeným zavěšeným izolátorem a vývody pro vysoké napětí a uzemnění	58
Obrázek 18: Možná konfigurace zařízení připraveného na zkoušku s kompresorem a nádrží v popředí	59
Obrázek 19: možné umístění zařízení v laboratoři vysokých napětí	60

Seznam tabulek

Tabulka 1: seznam použitých veličin	9
Tabulka 2: seznam použitých zkratk	9
Tabulka 3: Stupně znečištění podle oblasti, ve které se nachází navrhovaný izolátor	27
Tabulka 4: Odhadované stupně znečištění podle vzdálenosti oblasti od zdroje znečištění	27
Tabulka 5: hodnoty exponentů m pro korekci na hustotu vzduchu a w pro korekci na vlhkost vzduchu v závislosti na parametru g	56

1. ÚVOD

Izolátory jsou důležitou součástí nadzemních vedení vysokého, velmi vysokého a zvláště vysokého napětí, ať už se jedná o přenosová, distribuční nebo trakční vedení. V podstatě na nich závisí správná funkčnost celých soustav. Během provozu jsou izolátory vystaveny venkovnímu prostředí, kde na ně mohou působit nejrůznější nepříznivé vlivy, způsobující zhoršení nebo dokonce selhání jejich funkce. Je tedy nutné, aby izolátory těmto vlivům odolávaly a zároveň vykazovaly velmi vysokou spolehlivost. Toho lze dosáhnout nejen neustálým vývojem stále lepších, kvalitnějších a dokonalejších dielektrických materiálů, ale také výrobou izolátorů různých konstrukcí, tvarů a profilů.

Před použitím v praxi musí být izolátory podrobeny mnoha nejrůznějším zkouškám a testům, které jsou uvedeny v normách. Tyto zkoušky mají nejen otestovat elektrické a mechanické parametry izolátoru za laboratorních podmínek, ale jejich cílem je i prověřit schopnost izolátorů odolat nestandardním atmosférickým podmínkám, kterým mohou být během provozu vystaveny.

Tato práce je zaměřena především na zkoušky elektrických parametrů za zhoršených provozních podmínek izolátoru, konkrétně za deště. Hlavním cílem této práce je návrh zkušebního zařízení, které by bylo schopno věrně tyto ztížené podmínky simulovat při dodržení všech požadovaných parametrů, které jsou uvedeny v normách, a zároveň respektovat podmínky Laboratoře vysokých napětí ČVUT – FEL v Praze, katedry elektroenergetiky. Předpokládá se využití navrženého zkušebního zařízení při zjišťování a ověřování elektrických parametrů izolátorů za mokra až do hladiny 110 kV.

2. IZOLÁTORY

Izolátor je elektrotechnické zařízení, které je vyrobeno z elektricky nevodivého materiálu. Skládá se z kovového příslušenství a z izolantu a používá se pro vzájemné galvanické oddělení jiných elektrotechnických zařízení nebo vodičů. Izolátory nalezneme například u distribučních a přenosových soustav mezi stožáry a vodiči vysokého či velmi vysokého napětí. Izolátor zde slouží k tomu, aby nedošlo k vodivému spojení vodiče a země přes stožár, tedy aby nedošlo k přeskoku napětí. Čím vyšší je rozdíl potenciálů na obou stranách izolátoru, tím je izolátor delší a jeho povrch větší. Protože izolátory nemohou být libovolně dlouhé, je snaha o co největší povrch v poměru k délce izolátoru, aby bylo zamezeno přeskoku po povrchu. Proto mají izolátory nejrůznější tvary, především válce s „talířovitými“ výstupky. Pro velmi vysoká napětí se z důvodu lepších mechanických vlastností izolátory řadí do řetězců, které mohou obsahovat až několik desítek izolátorů.

Izolátor tedy musí zamezit elektrickému přeskoku mezi vodičem a uzemněným stožárem nebo jiným zařízením. Elektrický přeskok je definován jako výboj mezi dvěma místy s rozdílným potenciálem, což může být právě zmiňovaný vodič a stožár. Tento výboj vzniká díky ionizaci okolního prostředí (vzduchu) a může přecházet po povrchu izolátoru nebo přímo. Dojde k překlenutí celého izolátoru a napětí mezi oběma izolovanými místy je pak prakticky nulové. Jakmile je přeskok přerušen, může izolátor opět obnovit svou izolační schopnost, pokud nedošlo během výboje k jeho poškození. Izolátor není namáhán jen elektricky, ale i mechanicky a chemicky. Je nutné, aby vydržel různé nepříznivé povětrnostní podmínky, velké změny teplot, vliv námrazy nebo zatížení vodiče hejnem ptáků a podobně. Funkci izolátoru také znesnadňují nejrůznější nečistoty, déšť, sníh a další přírodní vlivy, proti kterým je třeba ho chránit. Tato znečištění zvyšují vodivost povrchu izolátoru nebo okolního vzduchu a přeskok pak může nastat i při nižším napětí.

2.1. Parametry izolátorů

Přeskoková vzdálenost (arcing distance, případně dry arcing distance)

Jde o nejkratší vzdušnou vzdálenost mezi jednotlivými izolovanými částmi, v našem případě většinou mezi částí pod napětím (vodič) a uzemněnou částí (stožár). Lze ji tedy ovlivnit délkou izolátoru. „Dry arcing distance“ navíc znamená, že se nepočítá se znečištěním (a tedy se zvýšenou vodivostí) okolního izolačního média, kdy ve většině případů jde o vzduch.

Povrchová vzdálenost (creepage distance, nebo také leakage distance)

Jedná se opět o nejkratší vzdálenost mezi jednotlivými izolovanými částmi, ale tentokrát jde o vzdálenost po povrchu izolátoru. Povrchovou vzdálenost lze zvýšit změnou tvaru izolátoru, tedy tak zvaným žebrováním, nejčastěji ve tvaru „talíře“. Do této vzdálenosti se nepočítají potenciálně vodivé části, které jsou k izolátoru připojeny, stejně jako pojivo, které je drží. Povrchová vzdálenost je asi nejvýznamnějším parametrem a často je volena podle nejvyšší možné očekávané míry znečištění v místě použití izolátoru. Musí se počítat s tím, že prostory mezi žebry mohou být zanášeny nečistotami a to tak, že mohou znesnadňovat přirozené čištění.

Vzdálenost mezi stříškami (shed-to-shed separation)

Tato vzdálenost je měřena při kraji izolátoru. Měří se od spodní části jedné stříšky k vrchní části stříšky pod ní. Spolu s hloubkou stříšky (shed depth) mají velký vliv na chování izolátoru při znečištění.

Činitel tvaru (form factor)

Jde o parametr, který je přímo závislý na vzdálenosti mezi stříškami a hloubce stříšky. Lze ho vypočítat podle vztahu

$$f = \int_0^L \frac{dl}{2\pi R(l)} \quad (2.1)$$

kde

L je povrchová vzdálenost (m)

R je poloměr měřený od středu tyče k nejvzdálenějšímu okraji stříšky („talíře“) (m).

Činitel tvaru lze využít při porovnávání vlastností izolátorů se stejnou délkou, průměrem a povrchovou vzdáleností, ale s různým profilem, tedy tvarem a rozstupem stříšek. Protože ale většinou neznáme přesné funkce, které by přesně popsaly zakřivení a tvar jednotlivých stříšek, bývá uvedený činitel tvaru pouze přibližný, nicméně s dostatečnou přesností.

Průměr tyče (shaft diameter)

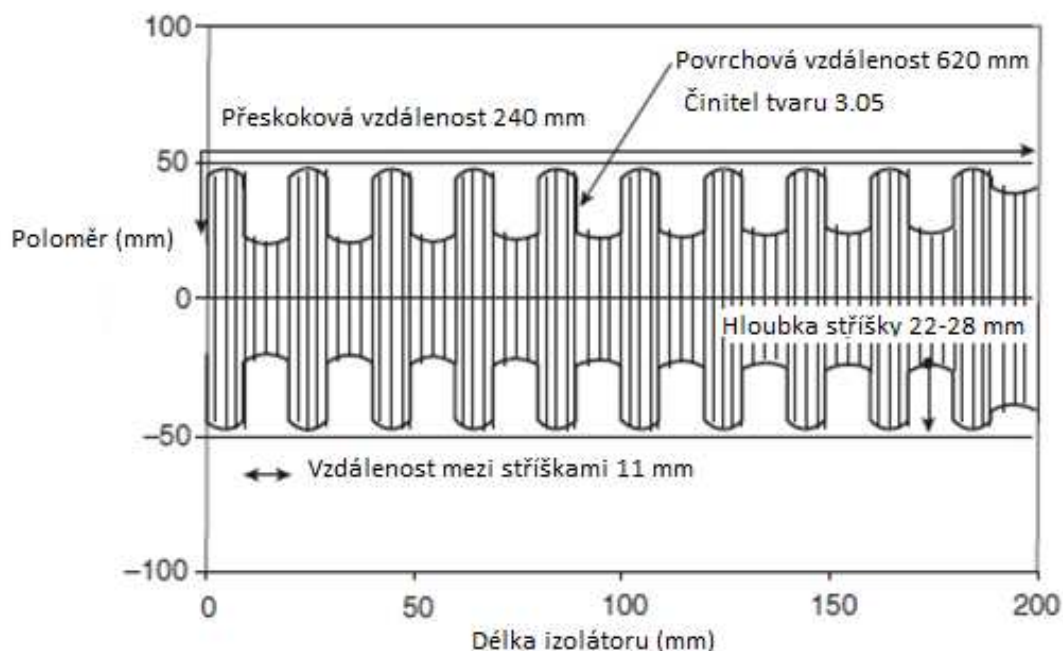
Průměr tyče odpovídá průměru nejužšího místa na celém izolátoru, což obvykle bývá právě nosná tyč. Tímto parametrem je určena celková schopnost odolávat mechanickému zatížení izolátoru. U kompozitních izolátorů lze tento parametr také vyjádřit jako tloušťku svazku skelných vláken tvořících nosnou tyč. Někdy se také s průměrem tyče uvádí průměr stříšky

(shed diameter), což je průměr nejširšího místa izolátoru a zajímá nás především kvůli možnému nánosu sněhu nebo námrazy. S průměrem tyče ze stejného důvodu souvisí i rozmístění stříšek (shed spacing), které nám popisuje, jak daleko jsou od sebe středy jednotlivých stříšek.

Tloušťka stěn

Tento parametr lze nalézt pouze u dutých izolátorů, u kterých hrozí, že by mohlo dojít k průrazu jejich stěn a mohl by nastat takzvaný vnitřní přeskok přímo skrz izolátor vlivem různých dutinek a prasklinek uvnitř materiálu, vzniklých během výroby.

V katalogích bývají dále uvedeny další mechanické a elektrické parametry, které se zpravidla nepočítají, ale jsou výsledkem nejrůznějších zkoušek a měření. Z elektrických parametrů jsou to například minimální výdržné střídavé napětí za sucha a za mokra, minimální výdržné impulzní přeskokové napětí kladné a záporné polarity. Mechanické vlastnosti se liší podle typu daného izolátoru. Jako příklad jsou uvedeny tyto parametry: specifické mechanické zatížení, jmenovité zatížení v ohybu a jmenovité zatížení v tahu. Jednotkou jmenovaných elektrických parametrů je kV, jednotkou mechanických parametrů je kN. [8]



Obrázek 1: naznačení parametrů izolátoru: přeskoková vzdálenost (dry arcing distance), povrchová vzdálenost (leakage distance), vzdálenost mezi stříškami (shed-to-shed separation), a hloubka stříšky (shed depth) u tyčového izolátoru [1]

2.2. Rozdělení izolátorů

Izolátory lze rozdělit podle materiálu, ze kterého je izolátor zkonstruován, podle typu izolátoru a způsobu jeho využití v elektrizační soustavě a v jeho umístění.

2.2.1. Rozdělení podle použitého materiálu

Keramické izolátory

Keramické izolátory se začaly vyrábět jako vůbec první izolátory pro telegrafní linky již roku 1839, kdy bylo zjištěno, že vodič není možné kvůli vzniklým ztrátám a rušení připevnit přímo na stožár (tehdy byly využívány dřevěné stožáry). Od té doby se dodnes keramické izolátory využívají v nejrůznějších modifikacích pro všechny hladiny napětí. [1]

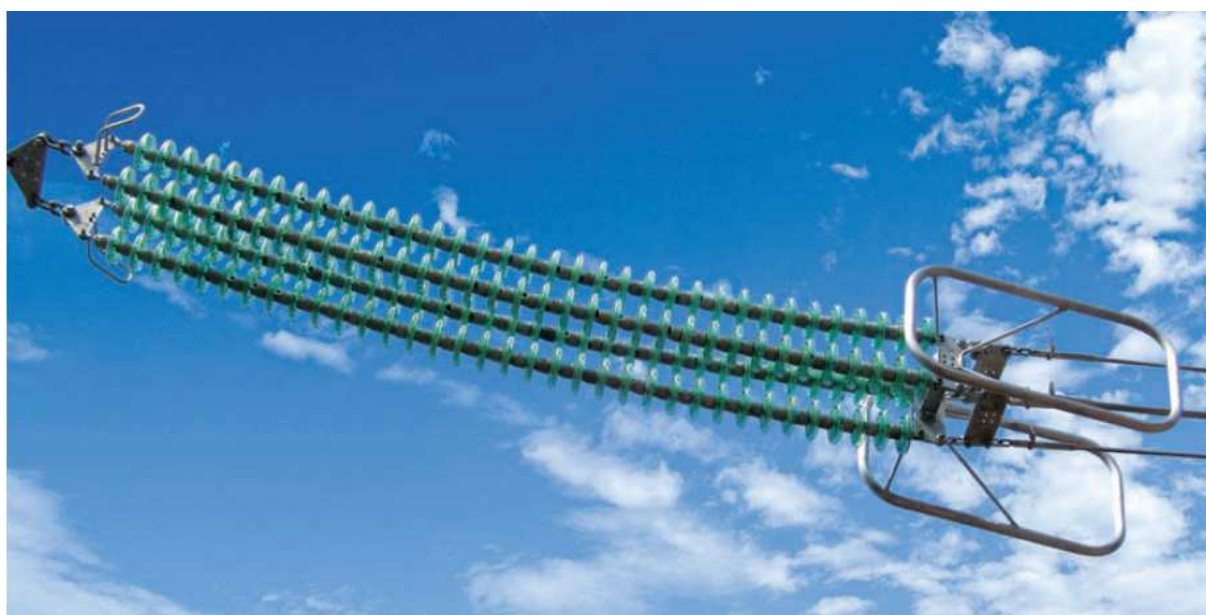
Hlavním materiálem pro výrobu těchto izolátorů je keramická hlína, ve které je směs křemene, živce a kaolinu, případně dalších látek. Tato hlína se nejprve vytvaruje do požadovaného tvaru, následně se vypálí ve speciální regulovatelné peci a vznikne porcelán, který je potažen (glazurován) látkou na bázi skla udávající jeho barvu a chránící materiál před vlhkem. Rozdíl ve velikosti před a po vypálení izolátoru smí být maximálně 3%. Dnes existují i výrobní procesy, kdy je porcelán vypalován za vlhka (wet-process) a glazurování kvůli nepropustnosti vody tedy není nutné, nicméně se využívá, aby byl povrch izolátoru hladší a tím se omezila možnost jeho znečištění, a také zvyšuje povrchovou impedanci. Během celého procesu nesmí vzniknout žádné trhlinky nebo větší bublinky, protože by to výrazně změnilo celkové elektrické i mechanické vlastnosti. Struktura je pak poměrně pevná díky silným polárním vazbám mezi kyslíkem a křemíkem. Po dokončení se na porcelánový izolátor namontuje kovové příslušenství, které je přilepeno pomocí látky na bázi cementu. To vše zaručuje mimo pevnosti ještě odolnost proti vyšším teplotám a díky glazuře i značnou chemickou odolnost. Navíc je výroba poměrně levná. Díky svým vlastnostem ale porcelán trpí na velmi snadné znečištění povrchu a drží se na něm voda, takže se zvyšuje elektrická vodivost. Barva bývá většinou bílá, béžová nebo hnědá.

Oproti kompozitním materiálům mají tyto výhody: není problém s jejich ekologickou likvidací, mají vyšší elektrickou pevnost, lepší mechanické vlastnosti, lépe snáší teplotní změny a lépe snáší elektrické výboje, to znamená, že po přeskoku jejich povrch tak snadno nedegraduje. K nevýhodám pak patří například poměrně vysoká hmotnost a větší náchylnost k mechanickému poškození.

Skleněné izolátory

Svémi vlastnostmi i výrobou jsou skleněné izolátory velmi podobné keramickým, mají ale rozdílné složení. To se skládá z křemene, uhličitanu sodného, dolomitu a vápence. V hladinách nad 22 kV se pro výrobu skleněných izolátorů využívá borité sklo.

Výhody a nevýhody opět víceméně odpovídají keramickým izolátorům, jen mají o něco vyšší izolační pevnost a díky tomu, že není nutné je tak dlouho vypalovat, je možné je vyrábět rychleji než izolátory keramické. Naopak co se týká mechanických vlastností, na keramické izolátory nestačí.



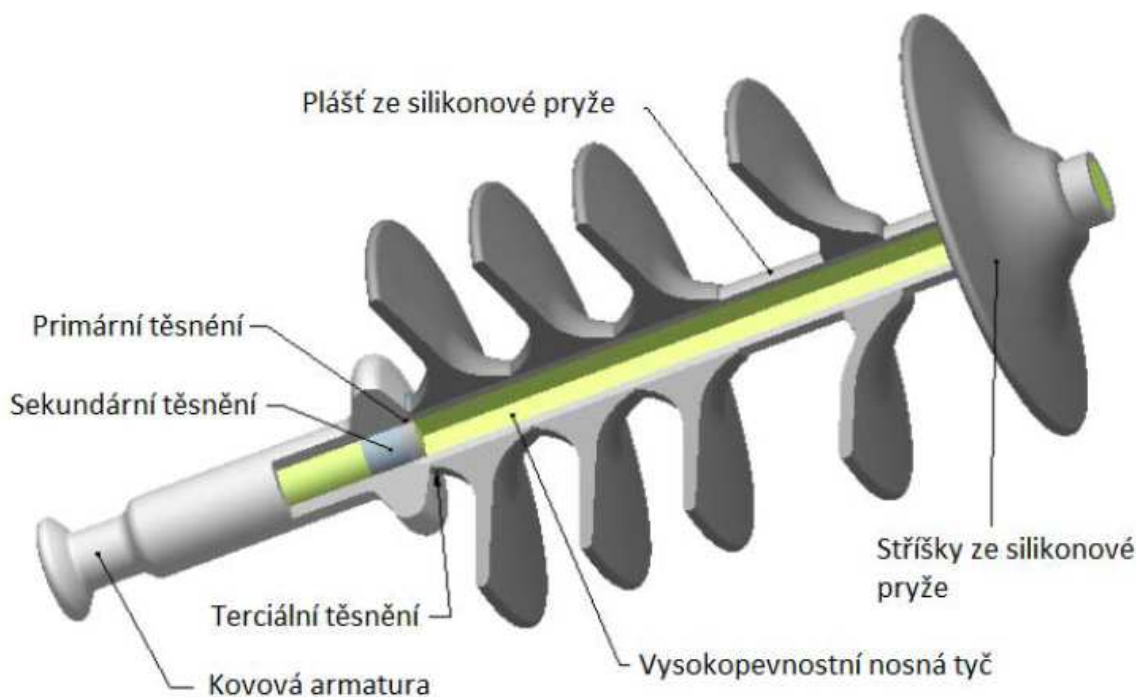
Obrázek 2: Řetězec skleněných čapkových izolátorů [8]

Izolátory z kompozitních materiálů

Na rozdíl od výše uvedených materiálů jsou kompozity novinkou, která je známa teprve pár desítek let. Jedná se o materiály skládající se ze dvou a více látek s různými vlastnostmi. Spojením těchto látek vznikne materiál s novými vlastnostmi, odlišných od původních vlastností výchozích látek. Díky tomu jsou kompozity velmi významné v nejrůznějších odvětvích, včetně elektrotechniky, kde se využívají jak u silnoproudých, tak u slaboproudých aplikací. Kompozit, který je užit jako materiál pro izolátory, se skládá z polymeru a skelného vlákna. Polymer slouží k ochraně skelného vlákna před vlivy počasí a před mechanickým poškozením. Skelné vlákno pak slouží jako pojivo a nosný prvek, které zajišťuje pevnost konstrukce. Polymery mají velké molekuly (makromolekuly), které jsou svázány slabou

vazebnou interakcí, a to van der Waalsovými silami. Pro využití v izolátorech jsou tedy použitelné polymery s vazbami uhlík-uhlík (C-C), ale dnes spíše křemík-kyslík (Si-O). Takový materiál pak svými vlastnostmi dokáže konkurovat porcelánu i sklu při daleko nižší hmotnosti.

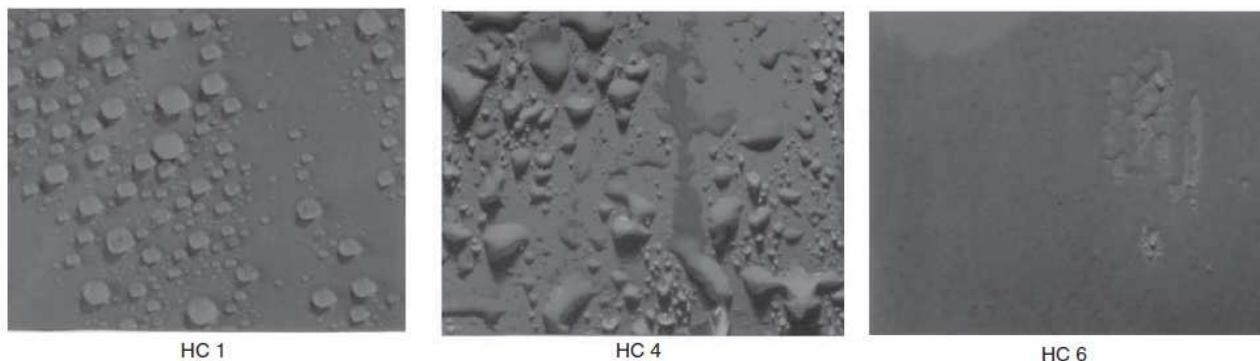
Realizace takového zařízení vypadá následovně: základ tvoří tyč z orientovaného skleněného vlákna, které je propojené polyesterem, epoxidem, případně jinou pryskyřicí. Tyč je vyráběna tažením za tepla a poté je na ni nanесena gumová vrstva, dnes především ze silikonové pryže. Z tyče jsou pak odsekávány menší kusy podle potřeby a na koncích jsou zbaveny pryže. Následně dojde k přivulkanizování stříšek (talířů), které jsou takto připevněny k tyči. Na závěr dojde k nalisování koncovek a kovových částí za studena a jejich utěsnění, aby ke spoji nikudy nemohla vniknout vlhkost a tím byla dodržena požadovaná životnost. [5]



Obrázek 3: Schéma kompozitního tyčového izolátoru s popisky jednotlivých částí [5]

Základní vlastností kompozitních izolátorů je hydrofobicita, tedy schopnost odpuzovat vodu. Tím pádem jsou odolnější jak proti působení vody, tak proti znečištění, které je z nich stékající vodou smýváno. Nejlépe hydrofobním polymerem se ukázala být právě již výše zmiňovaná silikonová pryž, která si tuto vlastnost uchovává na rozdíl od jiných polymerů velmi dlouhou dobu. Se snižující se teplotou se navíc tato vlastnost zlepšuje, dokud nezačne mrznout. Pod bodem mrazu mají naopak kompozity problém s namrzáním, které je ovlivňuje

víc, než keramické izolátory. Schopnost odolávat vodě se klasifikuje písmeny HC, od HC 1 (nejlepší) až po HC 6 (nejhorší), viz obrázek 5.



Obrázek 4: Ukázky různých povrchů s různou schopností odolávat vodě s klasifikací [1]

Kompozitní izolátory jsou dnes využívány především u distribučních a trakčních soustav v napěťových hladinách do 110 kV, lze ale pořídit izolátory až do hladiny 500 kV. K jejich výhodám patří nesporně daleko menší hmotnost (až je o 90% nižší oproti hmotnosti keramických izolátorů), tím pádem snadnější manipulace při montáži i při dopravě, schopnost odolávat vodě, vyšší povrchová impedance, daleko větší mechanická odolnost, nižší náklady oproti keramickým izolátorům u vysokých napěťových hladin a mírně vyšší spolehlivost. Nevýhodou jsou naopak problémy s jejich ekologickou likvidací. Také se jejich povrch nesmí odřít nebo poškrábat, protože pak rapidně ztrácejí svou schopnost odolávat znečištění, klesá hydrofobicita a dochází k jejich degradaci.

2.2.2. Rozdělení podle typu izolátoru

Čapkové (talířové) izolátory

Jak už název napovídá, hlavní částí tohoto typu izolátoru je porcelánový nebo skleněný „talíř“, který se stará o samotnou izolaci. K dalším částem patří čapka (cap), která je připevněna na hlavu izolátoru pomocí cementu a palička, která je uchycena v dutině izolátoru. Na čapce je navíc dutinka (pánvička, ball socket), která slouží pro uchycení závěsného oka nebo dalšího izolátoru v případě, že se vytváří takzvaný řetězec. Aby řetězec držel bezpečně, jsou použity závlačky, které nedovolí izolátorům vyklouznout z pánvičky.

Tyčové izolátory

Tyto izolátory nejsou duté jako talířové izolátory, protože je kladen důraz na vyšší mechanickou pevnost a odolnost. Zpravidla u nich totiž dochází k většímu namáhání. Hlavní

částí tyčových izolátorů je tělo ve tvaru tyče, která má zvlněný profil kvůli větší povrchové vzdálenosti. Dalšími částmi jsou stříšky, které jsou na koncích izolátoru a pro uchycení ke stožáru nebo k propojení většího počtu tyčových izolátorů do řetězce pro hladiny napětí nad 110 kV se využívají oka. Materiálem pro jejich výrobu může být porcelán a sklo, v dnešní době se však také čím dál víc používají kompozity.

Výhodou tyčových izolátorů je kratší délka oproti řetězcům talířových izolátorů, protože neobsahují spojovací součástky vyrobené z kovu, takže při stejné délce mají vyšší přeskokové napětí. Nicméně hlavní nevýhodou zůstává situace, kdy dojde k mechanickému poškození izolátoru. Vodič upevněný na řetězci talířových izolátorů zůstane po poškození izolace viset na kovové konstrukci, ale tyčový izolátor se může rozlomit, vodič spadne na zem a dojde k zemnímu spojení.

Z talířových a tyčových izolátorů se pak mohou déle skládat následující izolátory:

Podpěrné izolátory

Tyto izolátory se v našich elektrických soustavách využívají především pro nižší napěťové hladiny, tedy 35 kV a méně, jejich využití je tedy výhradně u vedení distribučních soustav. Lze je snadno poznat tak, že jejich poloha na sloupu je kolmo k zemi směrem nahoru a vodiče jsou k nim připevněny v jejich horní části. Proto jejich název: v podstatě vodiče podpírají. Tyto izolátory bývají zpravidla tyčové, jako materiál se volí keramika.

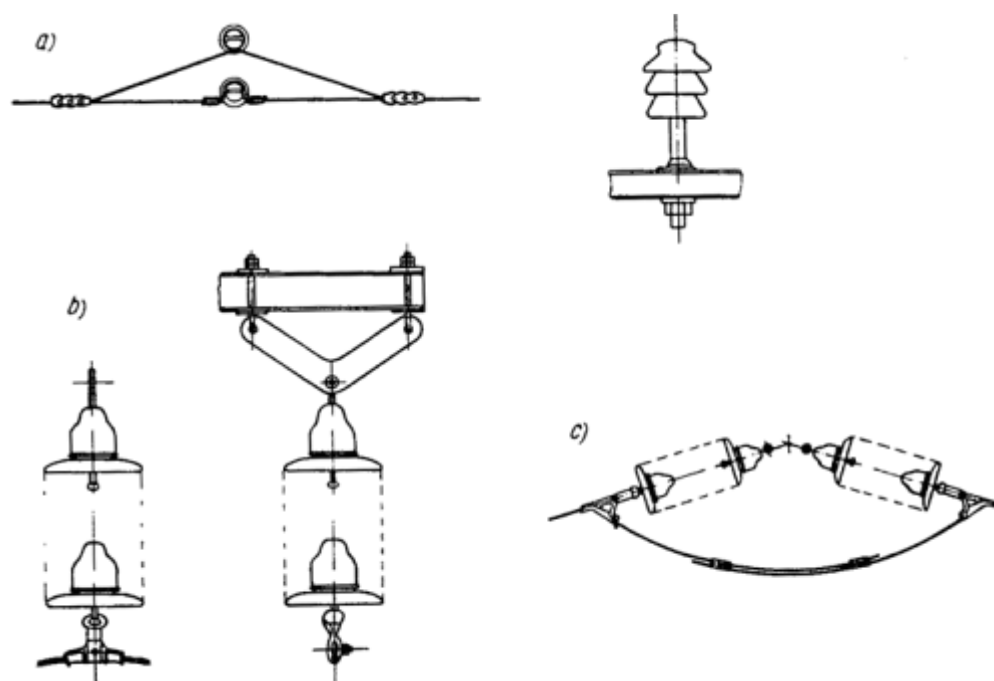
Závěsné izolátory

Závěsné izolátory se u nás využívají jak u distribučních, tak především u přenosových soustav pro napěťové hladiny 110 kV a výše. Na rozdíl od podpěrných izolátorů je poloha závěsných izolátorů na stožárech kolmá k zemi směrem dolů a vodiče jsou uchyceny ve spodní části, jsou tedy „zavěšeny“. Jako závěsné izolátory se používají samotné tyčové izolátory, řetězce tyčových izolátorů a řetězce talířových izolátorů. Materiálem pro výrobu závěsných izolátorů bývá porcelán, sklo i kompozit.

Kotevní izolátory

Konstrukce kotevních izolátorů je velmi podobná konstrukci izolátorů závěsných, ale jejich poloha na sloupu není svislá, nýbrž vodorovná. Hlavní rozdíl je ale v tom, že jde vlastně o dva izolátory proti sobě, kdy každý má na jednom konci upevněný konec vodiče a na druhém konci jsou upevněny ke stožáru. Navíc je mezi jejich konci, kde jsou upevněny vodiče,

připojen ještě další vodič, který konce lan vzájemně propojuje. Z toho vyplývá, že kotevní izolátory se používají pro spojení dvou vodičů, aby mohlo být vedení delší (vodiče pochopitelně nemohou být libovolně dlouhé). Využívají se také pro celkové vylepšení mechanických vlastností celého vedení a napínání vodičů, aby při případné mechanické poruše a pádu několika stožárů nedošlo ke zničení vedení po celé jeho délce. Kotevní izolátory lze také najít u transpozičních stožárů, které se využívají kvůli odstranění nesymetrií na koncích vedení způsobených indukčnostmi, kde jsou díky kotevním izolátorům snáze prostřídány jednotlivé fáze. Opět bývají tvořeny řetězci tyčových nebo talířových izolátorů, materiály jsou také totožné se závěsnými izolátory, v praxi se ale spíše setkáme s keramickými a skleněnými.



Obrázek 5: typy izolátorů: a) podpěrný roubíkový izolátor, b) závěsný izolátor, c) kotevní izolátor [6]

2.3.3. Rozdělení podle umístění

Venkovní izolátory

Izolátory pro vyšší hladiny napětí, které jsou umístěny venku. Jedná se o veškeré izolátory použité v distribučních a přenosových soustavách, případně pro využití na železnicích. Izolátory pro venkovní vedení se dále dělí na dva typy:

Typ A – takový izolátor, jehož délka nejkratší průrazné dráhy v pevném izolačním materiálu je rovna alespoň polovině délky přeskokové vzdálenosti v okolí izolátoru.

Typ B – takový izolátor, jehož délka nejkratší průrazné dráhy v pevném izolačním materiálu je kratší, než polovina délky přeskokové vzdálenosti v okolí izolátoru.

Vnitřní izolátory

Tyto izolátory jsou konstruovány pro nižší napěťové hladiny, pro hladiny vysokého napětí a vyšší se příliš nepoužívají. Mají obecně menší rozměry a bývají určeny pro konstrukci a montáž elektrických přístrojů a rozvodů nízkého napětí. U vnitřních izolátorů není nutné zabývat se znečištěním, protože to je v jejich případě velmi omezeno.

3. ZNEČIŠTĚNÍ IZOLÁTORŮ

Nepříznivých vlivů, které mohou ovlivnit funkci izolátorů je velké množství. Jedná se o částice nebo energii, která negativním způsobem ovlivňuje funkci zařízení tím, že zhoršuje jeho elektrické i mechanické vlastnosti a přispívá ke snižování jeho životnosti degradací materiálu, ze kterého se jednotlivé části izolátoru skládají. Pochopitelně především záleží na tom, na jakém místě se izolátor nachází a jaké tam působí druhy znečištění. Izolátor ale musí nepříznivé vlivy překonat a nesmí dojít k jeho selhání. Tomu napomáhá jeho pravidelné čištění, ať už přirozené, nebo umělé.

3.1. Rozdělení prostředí podle způsobu znečištění:

Přímořské prostředí – poloha poblíž moře bývá nebezpečná v tom, že se ve vzduchu objevují prvky jako Na, Cl, Mg, K a další, z důvodu odpařování soli z moře. Velkou roli hraje také vítr, který bývá u pobřeží silnější.

Průmyslové prostředí – prostředí, které je velmi silně znečištěno popílkem, který vzniká spalováním uhlí nebo ropných produktů v elektrárnách a továrnách. Do průmyslového prostředí se počítá i okolí různých dolů, lomů a cementáren, kde se do vzduchu dostává obrovské množství prachu.

Městské prostředí – města jsou velkými zdroji znečištění především kvůli velké koncentraci automobilů, které zamořují ovzduší svými výfukovými plyny. Dříve bylo znečištění ve městech podobné, jako v průmyslovém prostředí, ale v dnešní době se větší továrny ve městech již příliš nevyskytují. Ve městech je ovšem ta výhoda, že vedení distribučních sítí bývá kabelové a ukryté pod zemí, takže se se znečištěním příliš nesetká.

Venkovské prostředí – jedná se o prostředí, kde se sice tolik nevyskytuje smog a jiné druhy znečištění typické pro města, ale zato zde působí velkou částí ptáci kálající na izolátory a také hnojiva, ze kterých se při hnojení, zejména při práškování, také práší.

Pouštní prostředí – největší vliv zde má obrovské množství písku, který je větrem rozptýlován do okolí, a také v některých lokalitách velké množství soli. Problémem jsou také značné teplotní rozdíly mezi dnem a nocí. Zajímavostí je, že pouštní prostředí se velmi podobá situaci za velkých mrazů, protože se v zimě do ovzduší dostávají soli i písek z posypových materiálů na silnice.

V reálném životě se však spíše než s jednotlivými typy prostředí setkáváme s jejich kombinacemi.

Toto rozdělení lze také pojmut z hlediska velikosti území:

Oblast lokálního znečištění – často se mění míra usazenin na sledovaném povrchu, která navíc klesá se vzdáleností od zdroje znečištění. Tok znečištění ale lze z bodových zdrojů, jako například z komínů, předvídat. Liniové zdroje, jako jsou silnice, se příliš neuplatní.

Oblast rozsáhlejšího znečištění – zdroje jsou větší, jako například průmyslové oblasti, lesní požáry nebo moře. Míra usazenin se také často mění, ale naprosto nepředvídatelně, protože záleží pouze na povětrnostních podmínkách.

3.2. Usazování nečistot

Rozeznáváme tyto dva způsoby:

Usazování suchých nečistot – jde o nečistoty rozpustné ve vodě, které se hromadí na povrchu izolátoru a po jejich namočení se stávají elektricky vodivými. Na izolátor se dostávají hlavně díky působení větru, díky zemské přitažlivosti ale zůstávají pouze na horních stranách stříšek. Jedná se především o ionty Na, Cl, S, N a další.

Usazování vlhkých nečistot – k němu dochází při srážkách, jako je mlha, déšť nebo sněžení. Kapky vody nebo sněhové vločky s sebou nesou částičky nečistot. Dopadající voda také rozpouští nečistoty, které již na povrchu byly. Pak se může podle okolních podmínek stát, že povrch izolátoru výrazně zvýší svou vodivost.

V praxi se nečistoty usazují v letních měsících více na spodních stříškách izolátoru, protože při dešti jsou horní stříšky vystaveny většímu množství vody a jsou tak lépe omyty. V zimě a v období sucha s minimem srážek jsou naopak více znečištěny horní stříšky. Usazování nečistot je intenzivnější v případě, že je podporováno oteplováním izolátoru vlivem proudu tekoucím po povrchu izolátoru. Tento proces také mírně urychluje stárnutí materiálu, ze kterého je izolátor.

3.3. Parametry určující usazované nečistoty

Jedná se o vlastnosti lokálních nečistot, které nepříznivě ovlivňují funkci izolátorů. Jsou to: koncentrace nečistot ve vzduchu, měřena v (g/m^3), rychlost větru (obsahujícího nečistoty)

kolem povrchu izolátoru (m/s), orientace povrchu izolátoru vzhledem ke směru větru a schopnost materiálu odpuzovat nečistoty. Na usazování nečistot má vliv i tvar stříšek izolátoru. Plochy, které jsou kolmé na směr větru, se zanášejí daleko více. Také samotný profil izolátoru má podstatný vliv. Proto se vyrábí takzvané aerodynamické izolátory, které jsou vůči usazeninám odolnější až o 60% oproti klasickým izolátorům.

Po usazení nečistot na izolátoru se pak určuje množství nahromaděné na povrchu izolátoru (g/m^2 , spíše však $\mu\text{g/cm}^2$), které po namočení pochopitelně zvyšuje povrchovou vodivost. Tyto nečistoty lze rozdělit na dva typy:

1. ESDD – ekvivalentní hustota usazených solí (equivalent salt deposit density), která se udává v μg chloridu sodného (NaCl) na cm^2 povrchu. Jedná se o nečistoty rozpustné ve vodě, jako jsou oxidy SO_2 , NO_2 a jiné, vyjádřené jako odpovídající zastoupení NaCl. Při vysokonapěťových zkouškách za mokra tak není nutné používat nic jiného, než NaCl v potřebném množství, které odpovídá nečistotám. Množství ESDD, které se usadí na izolátor za určitý čas lze orientačně spočítat pomocí vzorce

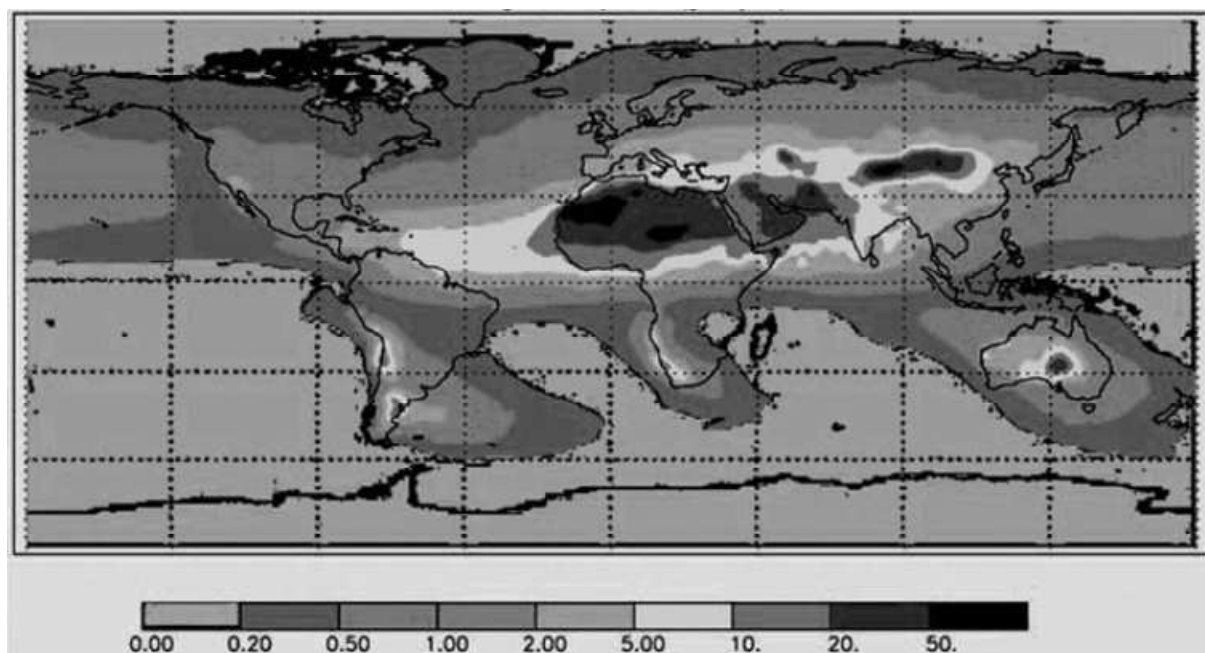
$$ESDD = C \sum_i (V_i^3 \cdot t_i) \quad (3.1)$$

kde

C je konstanta mezi 5 a $8 \cdot 10^{-6}$ podle prostředí a typu izolátoru (-)

V_i je průměrná rychlost větru v (ms^{-1}) za časový úsek t_i (h)

2. NSDD – hustota usazených nerozpustných látek (nonsoluble deposit density), také udávána v $\mu\text{g/cm}^2$. Jedná se především o prachové částice o velikosti $0,5 - 10 \mu\text{m}$, které se do vzduchu dostávají vlivem eroze. Tyto částice jsou přenášeny větrem i na velmi velké vzdálenosti. Místa jejich výskytu jsou vyznačena na obrázku 6.



Obrázek 6: průměrný roční výskyt prachových částic v g/m^2 [1]

Usazené nečistoty se vyskytují prakticky vždy jako kombinace ESDD a NSDD. Takový nános se stává vodivým až po zvlhčení. V klasifikaci znečištění se jedná o znečištění typu A.

Speciálním případem znečištění je také situace, kdy se na povrchu izolátoru usazuje tekutý elektrolyt obsahující buď velmi malé, nebo žádné množství nerozpustných složek (v podstatě pouze ESDD bez NSDD) a vodivost zajišťují výhradně ionty. Takové elektrolyty mohou být tvořeny krom NaCl , také například NaOH , NH_3 a jinými sloučeninami. Charakteristickými parametry elektrolytů je hodnota pH, určující kyselost nebo zásaditost elektrolytu, díky které lze odhadnout jeho složení a vliv na povrch izolátoru, a měrná elektrická vodivost elektrolytu σ , kterou lze vypočítat ze vztahu

$$\sigma = \frac{l}{S \cdot R} \quad (3.2)$$

kde

l je délka vzorku (cm)

S je obsah plochy kolmého průřezu (cm^2)

R je elektrický odpor vzorku délky l (Ω)

Prakticky používanou jednotkou měrné vodivosti je ($\mu\text{S/cm}$). V případě elektrolytu jde o typ znečištění B, který se ale při návrhu izolátorových řešení v České republice neuvažuje. [10]

3.4. Vliv teploty

Teplota má poměrně značný vliv na proces znečišťování izolátorů. S rostoucí teplotou totiž roste vodivost nánosu nečistot na povrchu izolátoru a s tím roste nebezpečí povrchového výboje. Závislost vodivosti nánosu nečistot na teplotě odpovídá přibližně nárůstu 2,2% na jeden stupeň Celsia ve vztahu k teplotě 20°C, respektive vodivosti za standardních podmínek σ_{20} . Tento jev je způsoben vlastnostmi vody, která v sobě nečistoty rozpouští. Konkrétně se jedná o lokální změny ve viskozitě vody způsobené změnami teploty za přítomnosti nejrozličnějších iontů, ačkoliv samotné ionty nejsou po chemické stránce nijak ovlivněny a nedochází u nich k žádným změnám. S rostoucí teplotou viskozita vody klesá a ionty se tak mohou pohybovat snáze. Největší rozdíly ve vodivosti, respektive ve viskozitě vody, nalezneme v okolí bodu mrazu vody, naopak nad 25 °C se změna příliš neprojevuje. Jiné je to s teplotami výrazně pod bodem mrazu vody. Jakmile voda zamrzne a stane se z ní led, je prakticky nevodivá, stává se velmi dobrým izolantem, dokud opět nezačne tát. Pokud ale led roztaje, je vodivost vody nižší než stejného vzorku bez zamrznutí. To je způsobeno dějem, kdy dojde k vyloučení většiny iontů, organických látek i solí rozpuštěných ve vodě při procesu mrznutí a voda se tak vlastně očistí.

Při našich výpočtech a měřeních je nutné závislost vodivosti vody na teplotě zohledňovat a přepočítat námi naměřenou vodivost na standardní podmínky, tedy na σ_{20} . Vzorec pro přepočet lze nalézt v podkapitole 3.3.2.

3.5. Měření míry znečištění ovzduší

Existuje mnoho metod pro vyhodnocení stupně znečištění ovzduší, uvedeny ale jsou pouze dva základní. Míru znečištění ovzduší v dané oblasti vyjadřují stupně znečištění.

3.5.1. Stupně znečištění

Pro návrh elektrické izolace se využívá klasifikace prostředí podle intenzity znečištění v dané oblasti do několika stupňů. Na území České republiky jsou tyto stupně 4 a jsou charakterizovány v následující tabulce (tabulka 1).

Tabulka 3: Stupně znečištění podle oblasti, ve které se nachází navrhovaný izolátor [10]

Stupeň znečištění	Charakteristika oblasti znečištění
Malé I	Oblast bez průmyslu s nízkou koncentrací domů s topným zařízením vytvářejícím znečištění. Oblast s nízkou koncentrací průmyslu a domů, ale vystavené častým větrům a deštům. Zemědělské oblasti bez intenzivního hnojení. Horské oblasti.
Střední II	Oblasti s průmyslem s nízkými exhalacemi a průměrnou koncentrací domů. Oblasti s vysokou koncentrací průmyslu a domů, ale vystavené častým větrům a deštům.
Silné III	Oblasti s vysokou koncentrací průmyslu a městské oblasti s vysokou koncentrací domů s topnými zařízeními vytvářejících znečištění.
Velmi silné IV	Oblasti v bezprostřední blízkosti zdrojů velkých znečištění.

Oblasti uvedené v tabulce 1 jsou přiřazovány daným lokalitám na základě měření koncentrace nečistot v ovzduší. Pokud nejsou data z měření dostupná nebo měření v dané lokalitě vůbec neproběhlo, je možné orientačně odhadnout stupeň znečištění podle tabulky 2.

Tabulka 4: Odhadované stupně znečištění podle vzdálenosti oblasti od zdroje znečištění [10]

Zdroj znečištění	Vzdálenost vnějších hranic oblasti o příslušném stupni znečištění v km		
	IV	III	II
Chemický kombinát	2	4 – 6	7 – 10
Chemický závod	1	2 – 3	4 – 6
Cementárna, vápenka, úložiště popílku	0,5	1,5	3,5
Hutě	1	2 – 3	4 – 6
Tepelná elektrárna (vzdálenost od chladicích věží)	0,6	2 – 3	4,5 – 6,5
Tepelná elektrárna (průtočné chlazení)	0,5	2	3 – 6
Teplárna	0,5	1,5	2 – 3

Stupně znečištění jsou také závislé na typu znečištění izolátoru. Jak je uvedeno v podkapitole 3.2, tyto typy jsou dva – Typ A (kombinace ESDD a NSDD) a Typ B (elektrolyty, v podstatě ESDD bez nerozpustných příměsí). Na našem území však zohledňujeme pouze Typ A.

3.5.2. Metodika vyhodnocení spadu

Jedná se o metodu, kdy se zachycuje spad do polyetylenových sedimentačních nádobek o objemu přibližně 1 litr a průměru (100 ± 10) mm. Dvě až tři nádoby jsou umístěny ve stanicích nebo na některých důležitých místech na vedení ve výšce přibližně 2 m a ponechávají se v dané oblasti alespoň 4 týdny. Před umístěním nádobek na pozice je nutné dbát na to, aby se do nich nedostávaly nečistoty spláchnuté deštěm z blízkých konstrukcí. Následuje zpracování spadu, kdy se obsah všech nádobek přesune do jedné nebo více odpařovacích misek a suší se při teplotě $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do úplného vysušení. Po vychladnutí jsou misky se spadem zváženy, odečte se hmotnost misek a získá se celkové množství spadu S_c v $(\text{mg}/\text{cm}^2\text{den})$. Po zvážení dojde k zalití vysušeného spadu destilovanou vodou a spad je louhován 24 hodin. Dále dojde k oddělení nerozpustných látek od rozpustných pomocí filtrace přes papírový filtr, který je předem namočen v destilované vodě, vysušen při $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a po vychladnutí v exsikátoru zvážen. Po filtraci na filtru zůstanou nerozpustné látky. S nimi je filtr opět sušen při teplotě $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, sušen v exsikátoru a zvážen. Po odečtení hmotnosti filtru získáme celkové množství nerozpustných látek v sedimentu. Hmotnost rozpustných látek S_r $(\text{mg}/\text{cm}^2\text{den})$ získáme tak, že odečteme hmotnost nerozpustných látek od celkového množství spadu. Filtrát rozpustných látek je sušen při $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pak je z něj připraven 0,2 % roztok v destilované vodě. Následně dojde ke změření jeho elektrické vodivosti a teploty. Získanou hodnotu vodivosti je nutné přepočítat na měrnou elektrickou vodivost při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ podle vztahu

$$\sigma_{0,2\%}(20) = \sigma_{0,2\%}(\theta) [1 - b (\theta - 20)] \quad (3.3)$$

kde:

$\sigma_{0,2\%}(20)$ je měrná elektrická vodivost 0,2 % roztoku rozpustných látek při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $(\mu\text{S}/\text{cm})$

$\sigma_{0,2\%}(\theta)$ je měrná elektrická vodivost 0,2 % roztoku rozpustných látek při teplotě $\theta\text{ }^{\circ}\text{C}$ $(\mu\text{S}/\text{cm})$

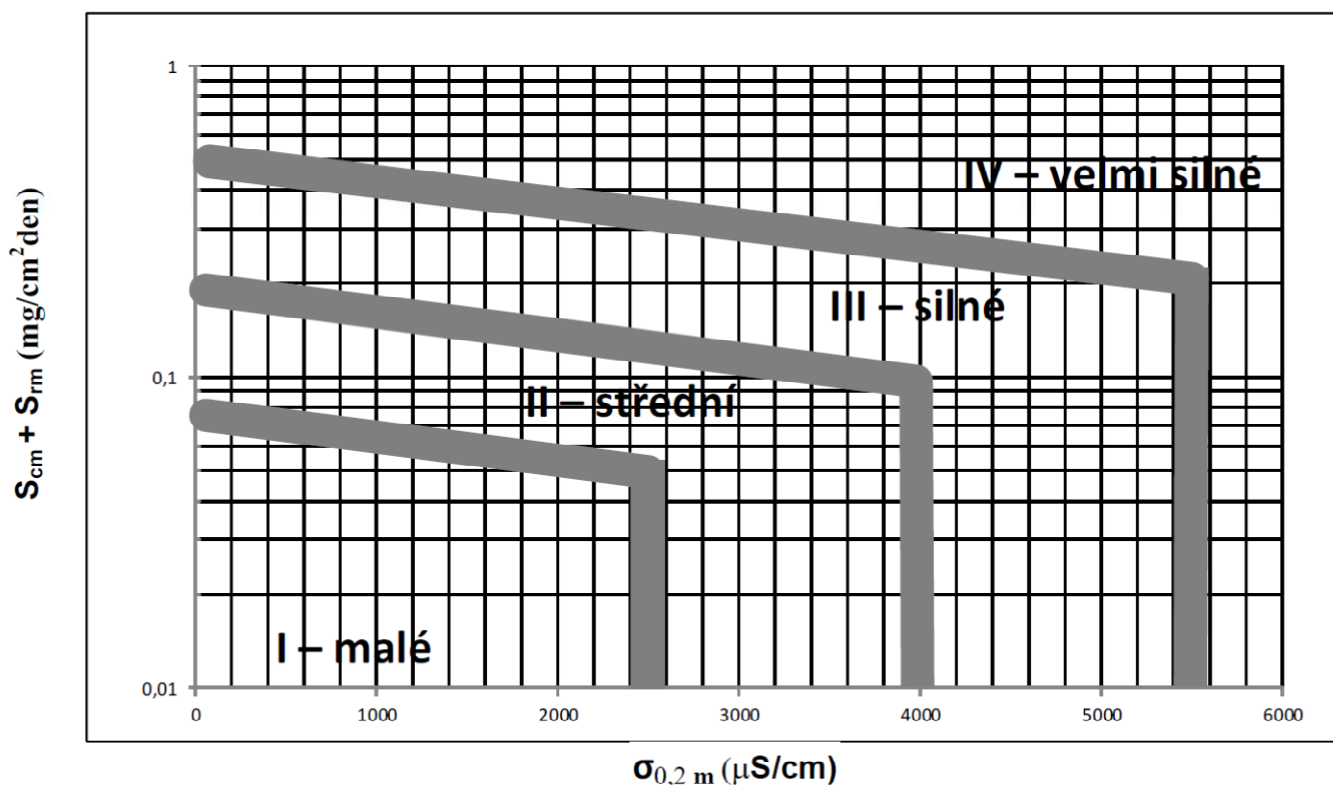
b je činitel závislý na teplotě θ získaný ze vzorce

$$b = 3,200 \cdot 10^{-8} \theta^3 + 1,032 \cdot 10^{-5} \theta^2 - 8,272 \cdot 10^{-4} \theta + 3,544 \cdot 10^{-2} \quad (3.4)$$

Získané hodnoty S_c , S_r a $\sigma_{0,2\%}$ se použijí pro stanovení maximálních hodnot S_{cm} , S_{rm} a $\sigma_{0,2m\%}$. Tyto hodnoty se stanoví statisticky pomocí Weibullova rozložení. Maximální hodnoty jsou

následně zaneseny do grafu (viz obrázek 7), kde na ose x jsou hodnoty $\sigma_{0,2m\%}$ a na ose y součet hodnot S_{cm} a S_{rm} . Z grafu jsou pak stanoveny stupně znečištění.

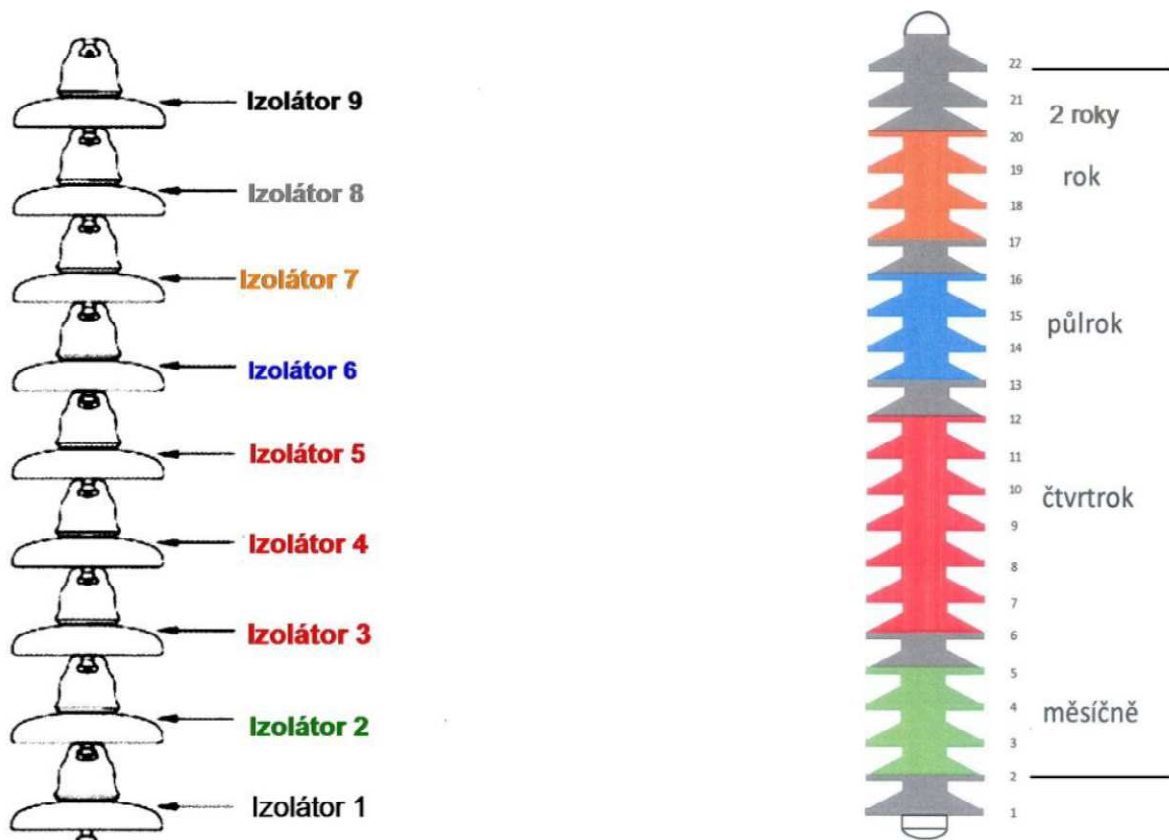
Metodika vyhodnocení spadu je vhodná zvláště pro vytvoření plošných map znečištění oblastí a byla použita i pro vytvoření mapy znečištění České republiky pro volbu izolace vedení a stanic vysokého, velmi vysokého a zvláště vysokého napětí. [10]



Obrázek 7: klasifikace stupně znečištění podle metodiky vyhodnocení spadu [10]

3.5.3. Metodika podle IEC 60815-1

Jedná se o metodu, která pro určení stupně znečištění ovzduší využívá měření ESDD a NSDD, prováděná na referenčním izolátoru, který pochází buď přímo z provozu, nebo ze zkušebního stanoviště. Správné zvolení izolátoru pro měření navíc dovoluje získat údaje pro přímé stanovení požadavků na povrchovou dráhu izolátoru. Také se někdy zároveň provádí chemický rozbor nečistot. Jako referenční izolátor se obvykle používá řetězec sedmi čapkových izolátorů nebo pro potlačení okrajových efektů řetězec devíti čapkových izolátorů, případně tyčový izolátor s alespoň čtrnácti stříškami. Každý izolátorový disk nebo stříška je monitorován v pravidelných intervalech, které jsou vyznačeny na obrázku 8. Měření by mělo probíhat před deštěm, mlhou a podobně podle příslušné předpovědi počasí.



Obrázek 8: rozdělení povrchu izolátoru podle kontrolních intervalů pro měření stupně znečištění [10]

Stírání nečistot z povrchu izolátoru pak lze provádět dvěma způsoby. Je nutné dodržovat určité zásady, jako nedotýkat se povrchu izolátoru, aby nedošlo k náhodnému setření nečistot. Je nutné používat chirurgické rukavice při práci se vzorky a před použitím dokonale vymýt odměrnou nádobu.

1. Technika stěru hadrem nebo štětcem

Do stírací vany se nalije 0,1 až 0,3 litru destilované vody s vodivostí nižší než 0,001 S/m a namočí se do ní hadřík, štětec, houbička, nebo jiný k tomu vhodný nástroj. Po vyždímání hadříku dojde ke stěru nečistot z povrchu izolátoru, až na kovové plochy nebo jiné podpůrné materiály. Pokud je to nutné (u stejnosměrného napětí), dojde k otření nečistot z horního a spodního povrchu izolátoru zvlášť. U tyčového izolátoru musí dojít k důkladnému očištění po celém povrchu stříšek shora i zespoda. Hadřík s usazeninami se následně ponoří do stírací vany, kde se nečistoty rozpustí v destilované vodě. Stěr se opakuje tak dlouho, až je povrch dokonale čistý. Pokud jsou nečistoty k povrchu pevně přischnuty, použije se k jejich odstranění špachtlička,

kteřá se musí omýt ve stírací vaničce. Z té by se neměla po celou dobu vylít řádná voda a množství vody by před stěrem a po něm mělo zůstat přibližně stejné.

2. Technika smývání (pro talířové izolátory)

je nutné zakrýt kovové části izolátoru plastovým nalepovacím obalem, ale nesmí dojít k zakrytí povrchu izolátoru. Opět je nutné, aby voda i nádoba, která bude použita k omýtí izolátoru, byla čistá. Do nádoby se nalije 0,5 až 1 litr destilované vody s vodivostí pod 0,001 S/m. Izolátor je uchycen za pánvičku, ponořen do vody a omýván lehkým poklepáváním rukou do okraje izolátoru. Poté se uchytí za paličku a proces se opakuje. Nakonec se voda z nádoby přelije do přepravní lahve tak, aby se s vodou přelily i všechny nečistoty.

Dále je nutné stanovit ESDD a NSDD.

Jako první se vypočítá ESDD, kdy je změřena vodivost a teplota vody obsahující rozpuštěné nečistoty, která je dostatečně promíchána. Míchání může trvat až 40 minut v závislosti na rozpustnosti látek ve vodě, pro rychlejší rozpuštění nečistot lze využít různé speciální postupy, jako metodu zahřívání nebo ultrazvukovou metodu. Po naměření vodivosti je třeba provést korekci na standardní podmínky podle vztahu

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad (3.5)$$

kde:

θ je teplota při rozpuštění (°C)

σ_{20} je vodivost při 20 °C (S·m⁻¹)

σ_{θ} je vodivost při teplotě θ (S·m⁻¹)

b je činitel závislý na teplotě θ , který lze získat ze vzorce 3.4

Následně lze vypočítat ESDD povrchu izolátoru podle vzorců

$$S_a = (5,7 \cdot \sigma_{20})^{1,03} \quad (3.6)$$

a

$$ESDD = \frac{S_a \cdot V}{S} \quad (3.7)$$

kde je:

S_a salinita (kg·m⁻³)

σ_{20} vodivost při 20 °C (S·m⁻¹)

ESDD ekvivalent hustoty usazených solí (mg·cm⁻²)

V objem destilované vody (cm^3)

S plocha povrchu izolátoru (cm^2)

Pokud se měří ESDD o hodnotě nižší než $0,001 \text{ mg/cm}^3$, doporučuje se používat vodu s velmi malou vodivostí (nižší než 10^{-4} S/m). Je možné použít i běžnou destilovanou nebo demineralizovanou vodu s takovou vodivostí, ale pak je nutné odečíst ekvivalentní množství soli vlastní vody od měřeného ESDD. Samotné množství použité vody pak závisí na množství nečistot. Při měření velkého znečištění nebo špatně rozpustných nečistot by mělo být použito většího množství vody, v praxi se pro měření používá 2 až 10 l vody pro omytí 1 m^2 povrchu izolátoru. Voda se přidává tak dlouho, až je její vodivost menší než $0,2 \text{ S/m}$, pokud je vodivost vyšší, pak nemuselo dojít k rozpuštění všech nečistot kvůli nedostatku vody.

Voda, která obsahuje nečistoty je po naměření ESDD filtrována přes předsušený a zvlažený filtrační papír. Ten je se zachycenými nečistotami vysušen a zvážen. Pak je možné vypočítat hodnotu NSDD pomocí vztahu

$$NSDD = 1000 \cdot \frac{m_f - m_i}{S} \quad (3.8)$$

kde:

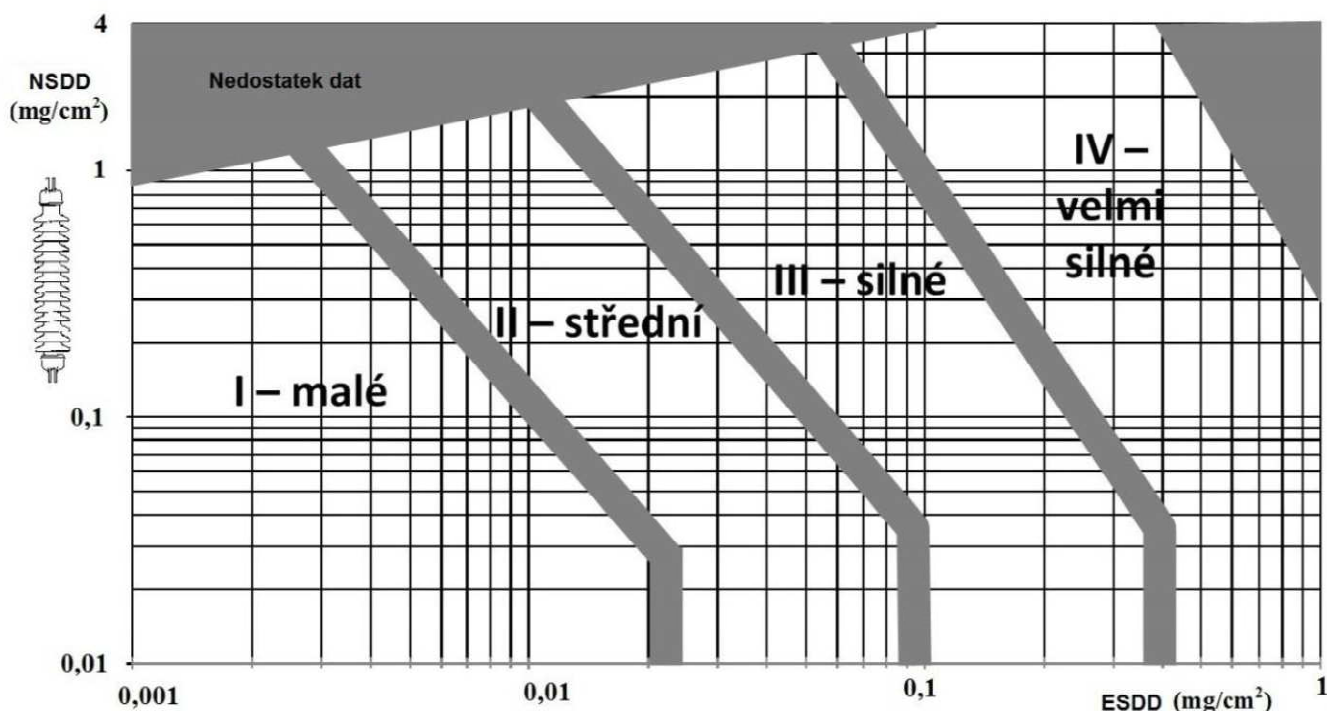
NSDD je hustota usazených nerozpustných látek (mg/cm^2)

m_f je hmotnost filtru s nečistotami po vysušení (g)

m_i je hmotnost suchého filtru před použitím

S je velikost plochy stíraného izolátoru

Hodnoty ESDD a NSDD se po naměření zanesou do grafu, který charakterizuje stupeň znečištění na příslušném referenčním izolátoru. Na osu x je vynášena hodnota ESDD, na osu y je vynášena hodnota NSDD. Na obrázku 9 můžeme vidět typický graf pro referenční tyčový izolátor. Pro zjištění stupně znečištění se využívá metodika podle IEC 60815-1 mimo jiné v případech, kdy se uvažuje s výstavbou stanic nebo vedení velmi vysokého a zvlášť vysokého napětí. [10]



Obrázek 9: Vztah mezi ESDD a NSDD pro referenční tyčové izolátory dle metodiky podle IEC 60815-1 [10]

3.6. Čištění izolátorů

Aby bylo možné izolátory využívat co nejdéle a pokud možno bez poruch, je třeba je jednou za čas zbavit nánosů usazených nečistot. Pokud by se tak nedělo, po určité době by byly příliš zašpiněny a při i lehkém zapršení by docházelo k přeskokům. Rozeznáváme dva způsoby očišťování izolátorů. Jedná se o přirozené čištění, které je zprostředkováno povětrnostními podmínkami a umělé čištění, které má na svědomí člověk.

3.6.1. Přirozené čištění

Jedná se o působení přírodních vlivů na izolátor, konkrétně dvou hlavních – větru a deště, v zimě se o čištění stará ještě sníh a led, když taje. Jsou to stejné jevy, při kterých dochází i k znečišťování izolátorů a o tom, jestli bude izolátor znečišťován nebo čištěn, rozhodují jeho vlastnosti, jako jsou rozměry, tvar, použitý materiál a oblast, ve které se nachází. Výzkumy prokázaly, že v pouštním prostředí vrstva nečistot na povrchu izolátoru průměrně roste prvních 18 měsíců a pak už zůstává stejná, o čištění se zde stará především vítr. Na našem území je ale důležitějším činitelem déšť. I velmi mírný déšť dokáže omýt vrchní stříšky izolátorů, ovšem pro omytí spodní strany stříšek je potřeba déšť silnější. Ukázalo se, že pro omytí 90% nečistot z celého izolátoru jsou nutné srážky o intenzitě minimálně 10 mm za hodinu, kdy voda stéká po celém povrchu. Záleží ovšem i na naneseném množství nečistot,

pokud je izolátor relativně čistý (nános ESDD je menší než $15 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), ani velmi silný déšť povrch příliš neomyje. Naopak u izolátoru s nánosem větším dochází k redukci ESDD až pod $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Pro omytí některých záhybů je však potřeba kombinace deště a silného větru. Lépe se omývají izolátory, které mají větší průměr stříšek a malý průměr tyče a vůbec nejlépe se omývají kotevní izolátory, protože jejich stříšky nejsou kolmé k zemi. [1]

Přirozené čištění je často jediný způsob, kterým jsou izolátory očišťovány. V mnoha zemích však není jiné čištění potřeba, protože je tohle dostatečné, levné a bezpracné.

3.6.2. Umělé čištění

Ačkoliv se nechává tato činnost často na přírodě, jsou případy, kdy je nutné izolátory čistit uměle, například při velmi nepříznivých povětrnostních podmínkách nebo v případě havárie nějaké továrny. Déšť a vítr také nedokážou vždy dokonale proniknout do nejrůznějších záhybů pod stříškami izolátorů a nečistoty se tam mohou stále držet. Pro takové situace jsou naplánovány postupy, které se provedou po vyhodnocení měření míry znečištění ve vzduchu, především ESDD, které by mělo v různých stanicích probíhat jednou za týden nebo 14 dní v závislosti na počtu deštivých dnů. Pro izolátory, které se nachází ve stanicích, bývá vypracovaný plán očišťování, ve kterém jsou předepsané intervaly čištění. Ačkoliv to v České republice nebývá příliš časté, v některých případech se čistí i izolátory na liniových vedeních. Takové čištění probíhá buď pomocí nízkotlakých, nebo vysokotlakých čističů s přesně definovanými rozměry trysek, případně pomocí lidské síly při vypnutém vedení. Voda v čističi by měla být pod tlakem alespoň 600 kPa a její vodivost by neměla přesahovat $700 \mu\text{S}/\text{cm}$, v zimě by měla být použita demineralizovaná voda o vodivosti maximálně $20 \mu\text{S}/\text{cm}$. Při ručním mytí by pak měl být použit látkový hadr s nízkým obsahem detergentu namočený ve vodě a následně by měl být izolátor opláchnut nízkotlakým čističem. Ze zkušeností vyplývá, že po 5 sekundách vysokotlakého čištění je izolátor zbaven poloviny nečistot, po 30 sekundách zbývá nečistot přibližně 15%. Toto čištění nesmí být ale příliš krátké, protože by mohlo naopak uškodit rozpuštěním nečistot a prudkým zvýšením povrchové vodivosti. Pokud je čištěn izolátorový řetězec, začíná se vždy od místa nejbližší vodiči a kývavým pohybem jsou čištěny ostatní části. Pokud je vodič pod napětím, končí se omývání vždy s nasměrovaným paprskem vody mimo vodič, aby při poklesu tlaku vody nedošlo k úrazu. Pro snížení možnosti úrazu je použito také speciální vybavení obsluhy čističe, jako je nevodivé a nehořlavé oblečení či brýle chránící před UV zářením.

Keramické a skleněné izolátory není třeba omývat, protože jsou potaženy glazurou, která je dostatečně chrání. U nich by mohlo dojít neopatrným omýváním ke snížení jejich odolnosti a zhoršení funkce. Povrch kompozitních izolátorů je sice odolnější vůči přeskoku při znečištění, je ale měkčí a nečistoty se na něm lépe drží a rychleji se zde usazují, čímž snižují jeho hydrofobii – schopnost odolávat vodě. Kompozitní izolátory je tedy nutné v některých oblastech omývat v pravidelných intervalech, pokud není dost dní s vydatným deštěm. Někteří výrobci doporučují pouze nízkotlaké čištění, u polymerových izolátorů se silikonovým povrchem lze však využít i vysokotlaké čištění při tlaku až 4000 kPa. Při takovém tlaku se snadno odhalí i výrobní vady izolátoru, protože může dojít k odlepení svrchní vrstvy a tím dojde k jeho zničení. Také je dočasně snížena hydrofobie, ale během několika dní až týdnů je znovu obnovena, případně lze pro okamžité obnovení použít sprej se silikonem.

Některé nečistoty není možné rozpustit vodou (například cement). Pro takové případy je nutné čistit izolátor ručně, kdy dojde k oškrábání nečistot. To je však poměrně nákladné a je to možné využít pouze několikrát, pak dojde k trvalému poškození povrchu izolátoru. Pro jiné než kompozitní izolátory se takový postup vůbec nedoporučuje. Před obroušením by mělo nejprve dojít k vysokotlakému omytí izolátoru, aby byla oškrábána jen místa s nerozpustnými nečistotami. Jako brusný materiál se používá nylon, drátěnka, brusná vata nebo ocelové kartáče. Povrch je následně leštěn a je nanášena ochranná silikonová vrstva. Obroušování lze provádět i pod napětím, je však třeba použít tyč z nevodivého materiálu o délce alespoň 100 mm a vlhkost vzduchu nesmí být vyšší než 20%. Tato metoda je však v porovnání s koupí nového izolátoru drahá, zvláště když se vezme v úvahu znehodnocení povrchu izolátoru. [1]

4. NAPĚŤOVÉ ZKOUŠKY IZOLÁTORŮ

Při napěťových zkouškách se ověřují elektrické parametry izolátorů při vývoji a před jejich uvedením do provozu. Zkoušky mohou probíhat jak na samostatných izolátorech, tak na celých izolátorových řetězcích či závěsech, kdy jsou obsaženy i kovové spojky a ostatní příslušenství. Aby výsledky zkoušek byly relevantní, je doporučeno postupovat podle normy 60060-1, ve které jsou uvedeny všechny zkušební postupy nejen pro zkoušky používané při testování izolátorů, ale i dalších elektrotechnických zařízení. Izolátory bývají zkoušeny třemi typy zkoušek. Jsou to zkoušky střídavým napětím, zkoušky atmosférickým impulzním napětím a zkoušky spínacími impulzy, které se provádí za sucha, za mokra a za umělého znečištění, aby byly co nejlépe simulovány všechny možné provozní podmínky a stavy izolátoru. Zkoušky za sucha jsou nejjednodušším typem zkoušek a provádí se skoro pokaždé, zkoušky za mokra mají co nejvěrněji napodobit provozní podmínky za deště. Zkoušky za umělého znečištění simulují zašpinění izolátoru během provozu, jsou velmi náročné na zkušební zařízení, tato práce se jimi však nezabývá. Během všech typů zkoušek jsou izolátory upevněny tak, aby toto upevnění co nejvíce odpovídalo skutečné poloze a uchycení izolátoru při praktickém použití.

4.1. Zkoušky střídavým napětím

Zkoušky střídavým napětím probíhají obvykle za takzvaného průmyslového kmitočtu, což znamená, že se frekvence udržuje v rozsahu 45 – 65 Hz. Tvar vlny napětí se musí blížit sinusovému průběhu a po rozdílu kladné a záporné amplitudy nesmí vyjít odchylka vyšší než 2%. Vliv malých odchylek od ideálního sinusového průběhu lze zanedbat, pokud je poměr vrcholové hodnoty napětí vůči efektivní hodnotě roven $\sqrt{2}$ s povolenou odchylkou $\pm 5\%$, ovšem pro běžné užití je nutné počítat s odchylkou vyšší. Při zkouškách s dobou trvání pod 60 sekund je nutné, aby se po celou dobu zkoušky měřené hodnoty přiloženého zkušebního napětí pohybovaly v rozmezí $\pm 1\%$ okolo požadované napěťové hladiny, při zkouškách s dobou trvání nad 60 sekund je povolena odchylka $\pm 3\%$. [11]

Zdroj zkušebních napětí včetně podpůrných kapacit by měl pokrýt přechodové proudy způsobené výboji i při zkouškách za umělého deště a znečištění tak, aby poklesy napětí byly nižší než 20%. Takové požadavky většinou splňuje zvyšovací transformátor, využívají se ale i různé sériové či paralelní rezonanční obvody. Napětí zkušebního obvodu musí být dostatečně stabilní, aby nedocházelo k jeho zkreslení vlivem proměnlivých svodových proudů. Pokud

bude docházet k neprůrazným výbojům, nesmí způsobit snížení napětí v takové míře, aby došlo k výraznému ovlivnění měřeného napětí průrazných výbojů. Při dielektrických zkouškách nad 100 kV je nutné mít systém se jmenovitým proudem alespoň o 1 A a celkovou zkratovou impedancí nižší než 20%, pokud se nepřetržitě vyskytují předvýboje, hlavně během zkoušky za umělého deště. Při nepřetržitém výskytu předvýbojů je také lepší měřit s rychlejší odezvou, aby se poklesy zkušebního napětí vešly do povoleného rozptylu. Celková kapacita zkušebního obvodu by pak měla být dostatečná na to, aby měřené napětí průrazných výbojů nepodléhalo vlivu nepřeskokovými částečnými výboji a předvýboji na zkoušeném objektu, pro zkoušky nad 100 kV je doporučena minimální kapacita 1000 pF. Samotné měření napětí pak musí probíhat dle normy ČSN EN 60060-2 s rozšířenou nejistotou nejvýše 3%. Proud je měřen proudovým transformátorem.

4.1.1. Zkoušky výdržným napětím

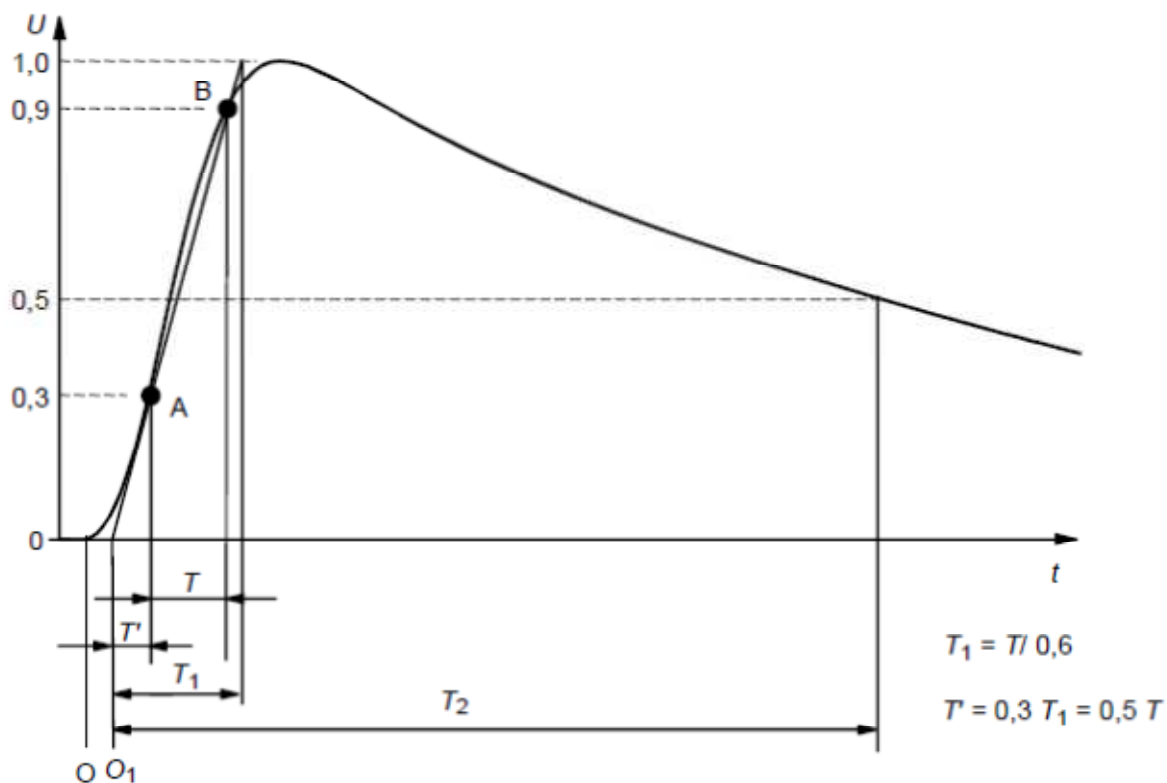
Na zkoušený objekt je nejprve přiloženo napětí o dostatečně nízké hodnotě pro vyloučení vlivu přepětí, které by se mohlo objevit při spínacím procesu nebo kvůli nekontrolovatelným rezonančním podmínkám. Napětí je pak pomalu zvyšováno s takovou rychlostí, aby bylo možné odečítat údaje z měřicího přístroje, ale ne příliš pomalu, protože by docházelo ke zbytečnému namáhání zkoušeného objektu, což odpovídá nárůstu asi 2% zkušebního napětí za sekundu při přiloženém napětí o velikosti větší než 75% předpokládaného výdržného napětí. Po uplynutí doby trvání zkoušky (obvykle 60 s) se napětí musí snížit rychle, ale nesmí dojít k náhlému odpojení, neboť by mohlo dojít ke vzniku spínacích přechodových přepětí, která by mohla zkoušený objekt poškodit nebo zkreslit naměřené hodnoty. Zkoušený objekt vyhoví v případě, že na něm po celou dobu zkoušky nedojde k průraznému výboji.

4.1.2. Zkoušky (zaručeného) napětí průrazného výboje

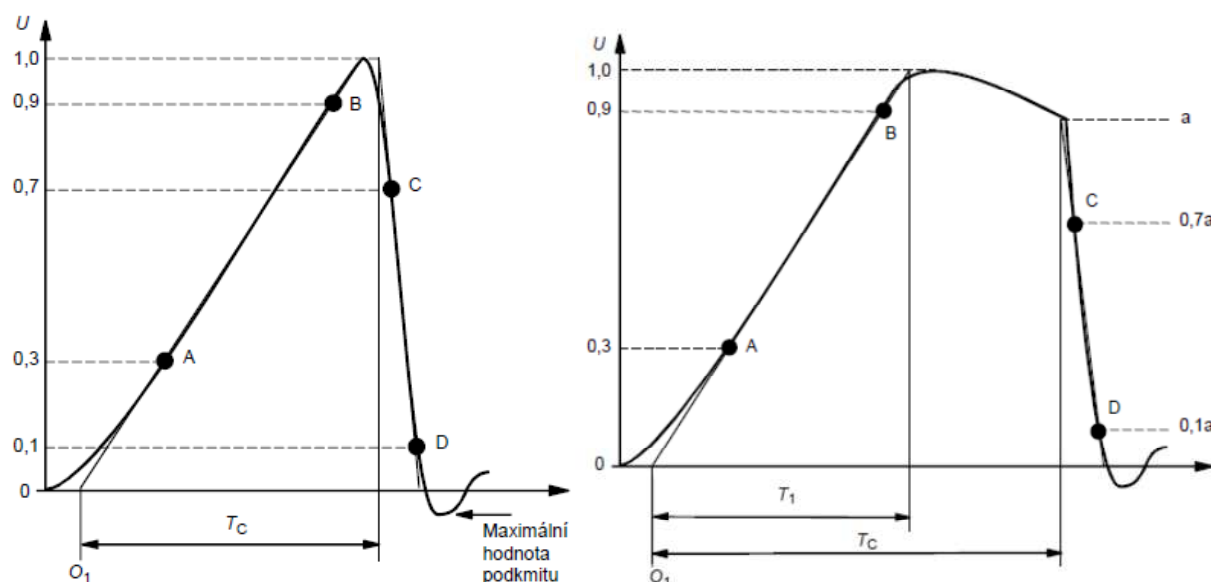
Na zkoušený objekt je opět přiloženo napětí o dostatečně nízké hodnotě a jeho zvyšování odpovídá postupu při zkoušce výdržným napětím, ovšem nezastaví se na předpokládané hodnotě, ale ve zvyšování se pokračuje až do průrazného výboje na zkoušeném objektu, přičemž musí být zaznamenána hodnota napětí v okamžiku výboje. Tento postup je n-krát zopakován a musí se dosáhnout n předepsaných hodnot dle zkušební postupu a příslušné technické komise, která určí i rychlost nárůstu napětí a postup zpracování výsledků. Zkoušený objekt splní požadavky, pokud průrazné napětí v sadě nepřekročí napětí průrazného výboje.

4.2. Zkoušky atmosférickým impulzním napětím

Jedná se o zkoušky aperiodickým přechodným napětím, které rychle narůstá do vrcholové hodnoty a následně pomaleji klesá k nule. Jednotlivé impulzy se nazývají atmosférické a mají přesně definovaný tvar a dobu trvání, viz obrázek 10. Jeho charakteristickými znaky jsou doba čela T_1 , která je definována jako $\frac{1}{0,6}$ násobek intervalu T , což je doba mezi okamžiky, kdy impulzní napětí dosáhne velikosti mezi 30% a 90% (v obrázku 10 jsou to body A a B) hodnoty zkušebního napětí. Dalším důležitým znakem je doba půltýlu T_2 , jež popisuje časový interval mezi bodem zdánlivého počátku O_1 a bodem, kdy hodnota impulzního napětí klesne k 50 % hodnoty zkušebního napětí. Pokud dosahuje hodnota T_1 doby trvání $1,2 \mu s$ a hodnota T_2 doby trvání $50 \mu s$, pak se jedná o normalizovaný atmosférický impulz označovaný jako impulz $1,2/50$ a s takovým impulzem je možné provádět tento typ zkoušek. Povolené odchylky pro normalizovaný atmosférický impulz jsou: hodnota zkušebního napětí $\pm 3\%$, doba čela $T_1 \pm 30\%$, doba půltýlu $T_2 \pm 20\%$ a relativní velikost překmitu nesmí překročit 10%. Při zkouškách také dochází v případě přeskočení k „odseknutí“ impulzu a jeho tvar je poněkud pozměněn, viz obrázek 11. Useknutí je pak charakterizováno parametrem T_c , tedy dobou useknutí, definovanou jako doba od zdánlivého počátku vlny až po useknutí vlny, které může nastat v čele, vrcholu nebo týlu. Pokud k useknutí dojde v době týlu, je impulz považován za plnou vlnu použitelnou pro vyhodnocení doby čela a zkušebního napětí. [11]



Obrázek 10: Typický tvar atmosférického impulzu kde T_1 je doba čela, T_2 je doba půltýlu, O je skutečný počátek a O_1 je zdánlivý počátek. Hodnoty napětí jsou zde vyjádřené v %.



Obrázek 11: Různé tvary useknutého atmosférického impulzu s vyznačenou dobou useknutí T_c

Zdrojem pro impulzní zkoušky je zpravidla impulzní generátor, který se skládá z kondenzátorů paralelně nabíjených zdrojem stejnosměrného napětí a vybíjených v sériovém

zapojení v obvodu se zkoušeným objektem. Měření napětí, časových údajů, překmitu či oscilace musí opět probíhat podle normy ČSN EN 60060-2, tedy měřit hodnotu napětí pro plné a v týlu useknuté impulzy s rozšířenou nejistotou nejvýše 3%. Vrcholová hodnota v čele useknutých impulzů může být měřena s rozšířenou nejistotou nejvýše 5%, časové parametry nejvýše 10%. Během měření musí být měřicí zařízení připojeno přímo na svorky zkoušeného předmětu. Při zkouškách je nutné kontrolovat tvar každého impulzu u všech zkoušených objektů, pokud nejsou zkoušeny identické objekty impulzy o totožných parametrech. V takovém případě se tvar ověřuje pouze jednou. Mělo by se zkoušet impulzním napětím obou polarit, ale pokud je jasné, která z polarit bude přinášet nepříznivější výsledky, stačí zkoušet touto polaritou.

Při zkouškách izolátorů nesmí dojít k poškození zkoušeného objektu, je ale povolené odštípnutí cementu nebo jiného pojícího materiálu, případně malé stopy na povrchu izolační části.

4.2.1. Zkoušky výdržným napětím

Postup zkoušek výdržným napětím se liší podle typu izolace zkoušeného objektu, konkrétní zkušební postup stanovuje příslušná technická komise. U metod A, B a C se při zkouškách využívá pouze jedna napěťová hladina, u metody D je nutné využít více hladin.

Postup A

Na zkoušený objekt dojde k postupnému přiložení tří impulzů daného průběhu a polarit na dané napěťové hladině. Zkoušený objekt vyhoví, pokud během zkoušky nedojde k poruše, definované technickou komisí.

Postup B

Na zkoušený objekt je postupně přiloženo 15 impulzů daného tvaru a polarit na dané napěťové hladině. Zkoušený objekt vyhoví, pokud dojde nejvýše ke dvěma průrazným výbojům v části samočinně se obnovující izolace a pokud není objevena porucha na samočinně se neobnovující izolaci.

Postup C

Na zkoušený objekt dojde k postupnému přiložení tří impulzů daného průběhu a polarit na dané napěťové hladině. Když nenastane průrazný výboj, zkoušený objekt zkoušku splnil,

pokud nastane více než jeden průrazný výboj, objekt nevyhověl. A v případě, že dojde pouze k jednomu výboji v části se samostatně se obnovující izolací, dojde k přiložení dalších devíti impulzů, kdy nesmí dojít k výboji a poruše na samočinně se neobnovující izolaci. Pak objekt vyhoví.

Postup D

Pokud se zkouší samočinně se obnovující izolace, je možné stanovit přímo 10% napětí průrazného výboje U_{10} nebo 50% napětí průrazného výboje U_{50} a z něj nepřímou U_{10} na základě statistických zkušebních postupů. Nepřímý výpočet U_{10} vychází ze vzorce

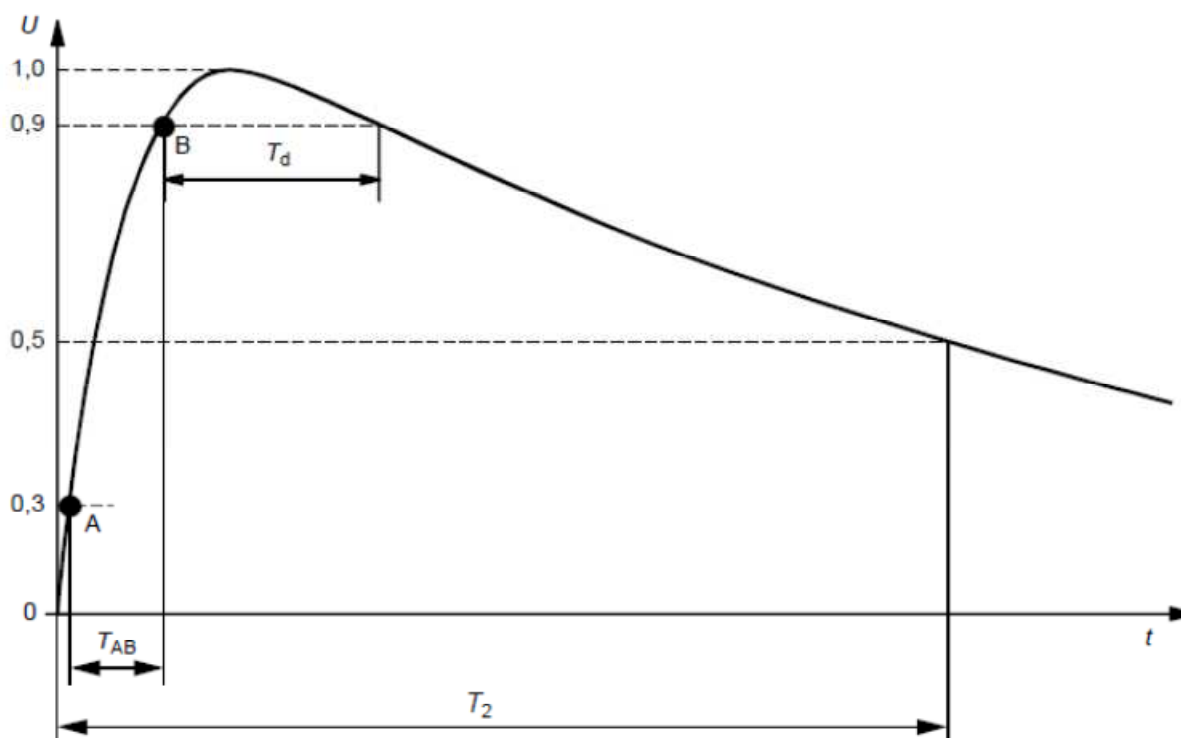
$$U_{10} = U_{50} \cdot (1 - 1,3s) \quad (4.1)$$

kde s je předpokládaná směrodatná odchylka napětí průrazného výboje (-).

Hodnotu parametru s stanovuje příslušná technická komise, při zkouškách za sucha se obecně používá jednotková hodnota $s = 0,03$. Pro zjištění U_{50} se používá metoda více hladin s alespoň čtyřmi hladinami a nejméně 10 impulzy na hladině, nebo metoda „nahoru-dolů“ s jedním impulzem na skupinu a s 20 platnými skupinami přiloženého napětí. Pro přímé zjištění U_{10} se také využívá metoda „nahoru-dolů“, ale zde obsahuje 7 impulzů na skupinu a nejméně 8 platných skupin. V každém případě by měl být dodržen krok mezi hladinami napětí v intervalu od 1,5% do 3% odhadnuté hodnoty U_{50} .

4.3. Zkoušky spínacími impulzy

Zkoušky probíhají podobně jako zkoušky atmosférickým impulzem, jen se zde používá impulz odlišného tvaru a s dobou čela alespoň 20 μs . Charakterizují ho parametry doba do vrcholu T_p , které označuje časový úsek od skutečného počátku do okamžiku maximální hodnoty spínacího napětí, doba vrcholu T_d označující čas, kdy je napětí vlny vyšší než 90% zkušebního napětí a doba půltýlu T_2 , definovaná jako časový interval mezi skutečným počátkem a okamžikem, kdy napětí klesne na polovinu nejvyšší hodnoty. Hodnoty normalizovaného spínacího impulzu označovaného jako impulz 250/2500 jsou $T_p = 250 \mu s$, $T_2 = 2500 \mu s$ a jeho tvar je možné vidět na obrázku 12. Pokud není stanoveno technickou komisí jinak, je tolerance hodnoty zkušebního napětí $\pm 3\%$, doby půltýlu $\pm 60\%$ a doby do vrcholu $\pm 20\%$. [11]



Obrázek 12: Typický tvar spínacího impulsu, kde T_d je doba vrcholu, T_{AB} je čas, za který napětí vzroste z 30% na 90% a T_2 je doba půltýlu

Dobu do vrcholu je třeba vypočítat ze vztahu

$$T_p = K \cdot T_{AB} \quad (4.2)$$

kde

T_p je doba do vrcholu (μs)

T_{AB} je doba nárůstu napětí z 30% na 90% zkušební napětí (μs)

K je konstanta, definovaná vztahem

$$K = 2,42 - 3,08 \cdot 10^{-3} T_{AB} + 1,52 \cdot 10^{-4} T_{AB}^2 \quad (4.3)$$

V případě nenormalizovaných spínacích impulsů je možné dobu do vrcholu T_p určit různými způsoby prokládání křivek dle skutečného tvaru.

Zdrojem je stejně jako při zkouškách atmosférickým impulzem impulzní generátor. Je třeba volit jeho jednotlivé části tak, aby nedocházelo k deformaci tvaru impulsu vlivem proudu při průrazném výboji na zkoušeném objektu. Tyto proudy totiž mohou zvláště při zkouškách při vysokém napětí dosahovat vysokých hodnot a v obvodech s vysokou vnitřní impedancí pak mohou způsobovat značné zkreslení či dokonce zamezit vzniku výboje. Zkušební napětí je

opět měřeno dle normy ČSN EN 60060-2 za stejných podmínek jako při zkouškách atmosférickým impulzem.

Zkušební postupy při zkouškách spínacími impulzy se obecně neliší od postupů zkoušek atmosférickými impulzy a vycházejí z podobných statistických úvah. V případě, že příslušná technická komise nestanoví jinak, předpokládaná směrodatná odchylka napětí průrazného výboje při zkouškách za sucha, mokra i umělého znečištění bez zahrnutí jiné izolace je $s = 0,06$. Při určování U_{50} , případně U_{10} lze použít větší rozestupy mezi napětíovými hladinami při metodě více hladin i metodě „nahoru-dolů“, která se preferuje při zkouškách za umělého deště.

4.4. Zkoušky za mokra

Nejen pro vysokonapětíové zkoušky izolátorů jsou zkoušky za mokra silně doporučovány a předepisovány v normách. Tyto zkoušky probíhají naprosto stejně jako zkoušky za sucha s tím, že na povrch izolátorů dopadá umělý déšť. Měření je doporučeno provádět pro všechny typy zkušebního napětí. Zkoušené objekty jsou ostříkovány vodou o definovaném odporu a teplotě. Je vyžadováno, aby se při ostříkování netvořila mlha nebo tříšť a kapky co nejvíce odpovídaly skutečnému dešti. Dále musí být dodržována minimální vzdálenost zkoušeného objektu od okolních předmětů a konstrukce, která by měla být minimálně 1 metr 1,5 násobek délky nejkratší možné výbojové cesty, nesmí docházet k výbojům na okolní předměty a vliv blízkosti nesmí zkreslovat výsledky. Také je třeba brát v potaz i rozložení napětí podél zkoušeného objektu a elektrické pole přírodních elektrod, které musí být nezávislé od vnějších vlivů. Před začátkem měření objekt musí být zadešťován upravenou vodou minimálně po dobu 15 minut, případně neupravenou vodou 15 minut a poté upravenou vodou další 2 minuty. Během zkoušek je pak třeba s určitou tolerancí dodržovat stejné podmínky jako při zadešťování, v žádném případě nesmí dojít k přerušení deště.

Umělý déšť by se měl co nejvíce podobat tomu reálnému, krom výše zmiňované velikosti kapek má mít tedy ještě další normou přesně definované parametry. Teplota umělého deště by měla zhruba odpovídat teplotě okolí, ale povolená odchylka teploty vody je ± 15 °C. Pro ostříkování zkoušeného objektu lze použít jakékoliv trysky a jejich uspořádání, ale ostříkování musí být rovnoměrné a vertikální i horizontální složka deště musí napršet ekvivalent srážek 1-2 mm/min, tedy 60-120 mm/h s odchylkou nejvýše $\pm 0,5$ mm/min, což odpovídá velmi silnému dešti. Horizontální a vertikální složka deště by měla být přibližně stejná, intenzita deště se kontroluje pomocí sběrné nádoby s oddělenými komorami pro

horizontální a vertikální složku a vstupním otvorem o průměru 100 až 750 cm². Ověření intenzity deště se provádí s měřicí zónou o maximální výšce 1m, pokud je objekt vyšší, rozdělí se měřicí zóny na horní, střední a dolní, kdy každá měřicí zóna musí obsáhnout 1/3 zkoušeného objektu. Jsou také kladeny přesné podmínky na elektrické vlastnosti vody, jejíž měrná elektrická vodivost by měla dosahovat hodnot $100 \pm 15 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a je třeba ji měřit těsně před započítáním zkoušek nejlépe přímo v nádrži zkušebního zařízení. Pro snížení rozptylu výsledků je vhodné před začátkem měření očistit povrch zkoušeného objektu povrchově aktivními detergenty, které je však třeba před přípravným zadešťováním odstranit, před zkouškou je totiž nutné, aby povrch izolátorů byl čistý a suchý. [11]

5. ZAŘÍZENÍ PRO ZKOUŠKY IZOLÁTORŮ ZA MOKRA

5.1. Požadavky na zařízení

Při samotném návrhu zařízení pro zkoušky izolátorů za mokra je nutné zohlednit všechny požadavky. Katedra elektroenergetiky požaduje, aby v zařízení bylo možné provádět zkoušky na izolátorech, které se používají pro hladiny až 110 kV. Dále by konstrukce měla být snadno složitelná a rozložitelná, protože v laboratoři vysokých napětí není dostatek místa pro stálý systém o tak velkých rozměrech. Také by bylo vhodné, aby nádrže na vodu o požadované vodivosti byly dostatečně objemné i pro delší zkoušky, které by mohly trvat až 60 minut. Požadavky na snadnou manipulaci se zařízením jsou samozřejmostí.

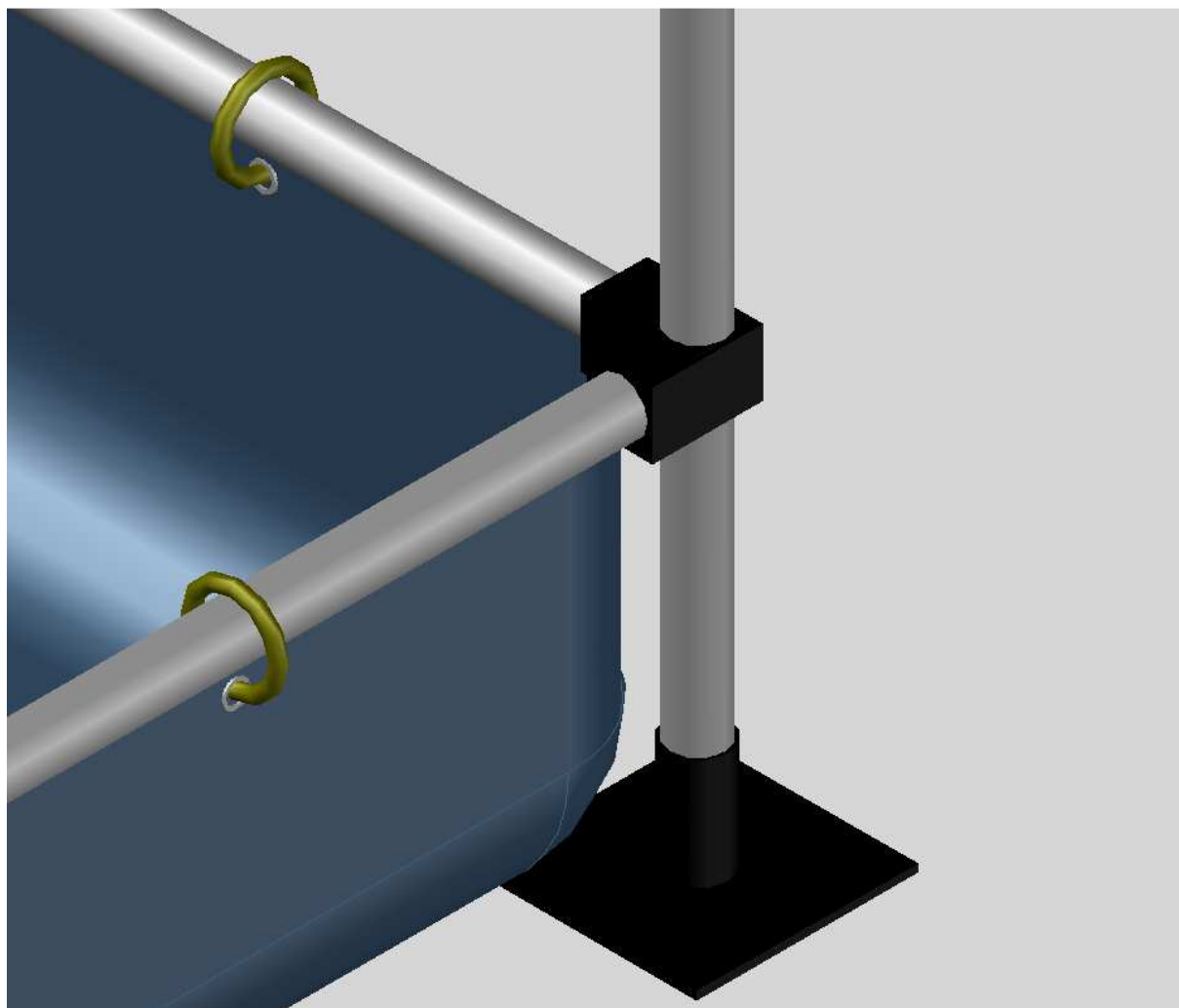
Také je nutné řídit se požadavky, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 60060-1. Část těchto požadavků je již uvedena v kapitole 4.4.

5.2 Návrh zařízení

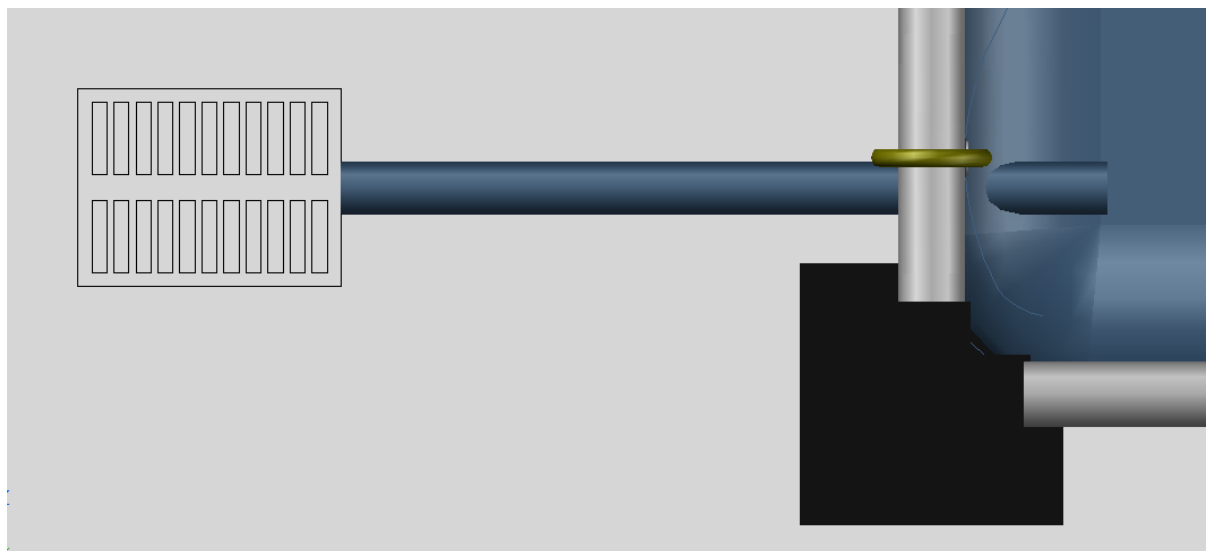
5.2.1. Návrh konstrukce

Aby bylo vyhověno výše uvedeným požadavkům, je navrhovaná konstrukce co nejjednodušší, její 3D model vypracovaný ve studentské verzi programu AutoCAD 2012 je možno vidět v příloze B. Nosná konstrukce se sestává celkem z 24 hliníkových trubek. Osm vertikálních trubek uložených v plastových podstavcích, sedm z nich o výšce 2,5 m a jedna o výšce 4,6 m, je seskládáno do čtverce o straně dlouhé 4 m. Tyto trubky spojuje dalších 16 horizontálních trubek o délce 2 m a pro zpevnění celé konstrukce jsou uloženy vždy dvě nad sebou, kdy první se nachází ve výšce 40 cm nad zemí a druhá je od ní vzdálena 2,1 m. Vertikální trubky jsou s horizontálními trubkami spojeny pomocí plastových spojek pevně připevněných na vertikálních trubkách. V těchto spojkách jsou otvory pro závlačky, aby byla zajištěna celková pevnost konstrukce a nemohlo snadno dojít k jejímu rozbití vlivem slabšího mechanického nárazu. Aby bylo zabráněno stříkání vody mimo prostor mezi vertikálními trubkami, je použito dvou plachet. Hlavní plachta o rozměrech 4,8 x 4,8 m je umístěna na dně zařízení a zavěšena pomocí oček na spodní horizontální trubky. Jejím úkolem je zachytávat všechnu vodu, která je během zkoušek vystřikána z trysek. Na jednom z okrajů plachty je umístěn otvor s výtokovou hadicí pro odtékání této vody do odtokového kanálu, kvůli možným změnám vlastností vody se nepočítá s jejím opětovným využitím. Na horních horizontálních trubkách je zavěšena plachta o rozměrech 1,85 x 8,5 m ve tvaru L, která kryje

celou konstrukci ze dvou stran, aby před stříkající vodou byly uchráněny předměty okolo zařízení a zároveň plachta nebránila přívodu vysokého napětí a uzemnění. Rozměry zařízení a použitý materiál byly zvoleny podle bezpečné vzdálenosti od testovaného izolátoru, aby nebylo měření ovlivněno vlivem blízkosti.



Obrázek 13: Detail upevnění hlavní plachty očky, pohled na rohovou plastovou spojku horizontálních trubek a pohled na podstavec vertikální trubky



Obrázek 14: detail výtokové trubice s naznačeným kanálem

5.2.2. Návrh trysek

Norma 60060-1 říká, že typ, rozměry i uspořádání trysek jsou libovolné, umělý déšť z nich však musí splňovat požadavky uvedené v kapitole 4.4. Bylo by možné použít i výtokové trubice, ale výhodou trysek oproti výtokovým trubicím jsou kapky umělého deště, které svým průměrem mezi 0,5 až 7 mm a nejčastějšímu výskytu kapek o průměru 3 – 3,5 mm odpovídají kapkám deště reálného. Skutečnému dešti odpovídá i dopadová energie kapek a umělý déšť je celkově homogenní. Pomocí trysek lze navíc dosáhnout větší intenzity deště (i přes 100 mm/h). Nevýhodou trysek je ovšem nutný přetlak v přívodním potrubí. [10]

Pro rovnoměrné ostřikování testovaného izolátoru byl zvolen systém tří nad sebou umístěných trysek, kdy nejvyšší je umístěna ve výšce 4,6 m nad zemí a 1,4 m nad zkoušeným izolátorem, aby úhel dopadu byl 45° a bylo tak dodrženo požadované vydatnosti deště, ve vertikálním i horizontálním směru jsme zvolili srážky o 65 mm/h na každou trysku. Předpokládá se, že zkoušený izolátor s namontovaným příslušenstvím nebude delší než 1,5 m a bude zavěšen nejméně 1,7 m nad zemí. Aby byl tento izolátor rovnoměrně ostřikován, zvolili jsme trysky společnosti Spraying Systems, konkrétně model FullJet G-15 s výstupním otvorem o průměru 1,6 mm, rozstříkem ve tvaru plného kužele a úhlem rozstřiku 15°. Trysky jsou umístěny přímo na přívodní hadici ve vertikálním směru s rozstupem 50 cm, přívodní hadice je dlouhá přibližně 6,7 m, její průměr je 50 mm a vede z nádrže, kterou je v našem případě sud o objemu 200 l. Ústí trysek jsou od izolátoru vzdáleny 2,83 m a v této vzdálenosti dopadá na izolátor kužel vody o podstavě s průměrem 0,75 m, takže se jednotlivé kužely budou

překrývat a na izolátoru nevznikne nezadešťovaná plocha. Úst'ová rychlost středního proudu z trysky byla vypočítána podle vzorce

$$v_0 = \frac{l}{\sqrt{\frac{2h}{g}}} \quad (5.1)$$

kde je

v_0 úst'ová rychlost středního proudu vody stříkající z trysky (ms^{-1})

l vzdálenost izolátoru od trysky (m)

h výška trysky nad místem ostřiku na izolátoru (m)

g tíhové zrychlení $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$.

Výška $h = 1,4 \text{ m}$ je zvolena tak, aby dopadající kapky středního proudu dopadaly na povrch izolátoru pod úhlem 45° (úst'ová rychlost musí odpovídat rychlosti volného pádu kapky) a byl tak splněn požadavek na vydatnost deště. Výsledná rychlost má hodnotu $v_0 = 5,3 \text{ ms}^{-1}$. Během výpočtu byl zanedbán vliv odporu vzduchu.

5.2.3. Výpočet přetlaku trysek

Abychom mohli vypočítat potřebný přetlak, potřebujeme nejprve zjistit potřebný objem vody o předepsané vodivosti, průtok a rychlost proudění kapaliny uvnitř zařízení pro ostřik. Pokud víme, že vertikální i horizontální složka deště odpovídá 65 mm/h a úhel dopadu činí 45° , pomocí Pythagorovy věty dopočítáme, že srážky při dopadu pod úhlem 45° činí 92 mm/h . Jestliže tyto srážky vztáhneme k nádobě ve tvaru válce s podstavou $0,75 \text{ m}$ (širší ekvivalent není potřeba, protože izolátory pro hladinu napětí 110 kV širší nebývají), ze vztahu pro objem válce

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (5.2)$$

kde je

V objem válce (m^3)

r poloměr válce (m)

h výška válce (m)

vychází, že námi potřebný objem vody vystříkaný za hodinu jednou tryskou je přibližně 40 l , všemi třemi tryskami pak 120 l . Aby nedošlo k úplnému vyčerpání vody a tím i k přílišnému poklesu tlaku v zařízení, doporučuji použít raději o 40 l více, tedy 160 l .

Z potřebného průtoku 120 l/h, tedy $3,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ pak lze vypočítat rychlost proudění vody v hadici ze vztahu

$$v = \frac{\dot{V}}{S} \quad (5.3)$$

kde

v je rychlost proudění kapaliny ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

\dot{V} je objemový průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

S je průřez nádobou, ve které kapalina proudí (m^2).

Rychlost proudění v hadici po dosažení příslušných hodnot vychází $v = 0,02 \text{ ms}^{-1}$. Během výpočtu se neuvažují ztráty vnitřním třením kapaliny.

Přetlak pro trysky pak lze vypočítat pomocí Bernoulliho rovnice ve výškovém tvaru. Ten udává vztah

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot h_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot h_2 \quad (5.4)$$

kde je

v_1 rychlost proudění v hadici ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

v_2 úst'ová rychlost trysky ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

h_1 výška hladiny vody v nádrži (m)

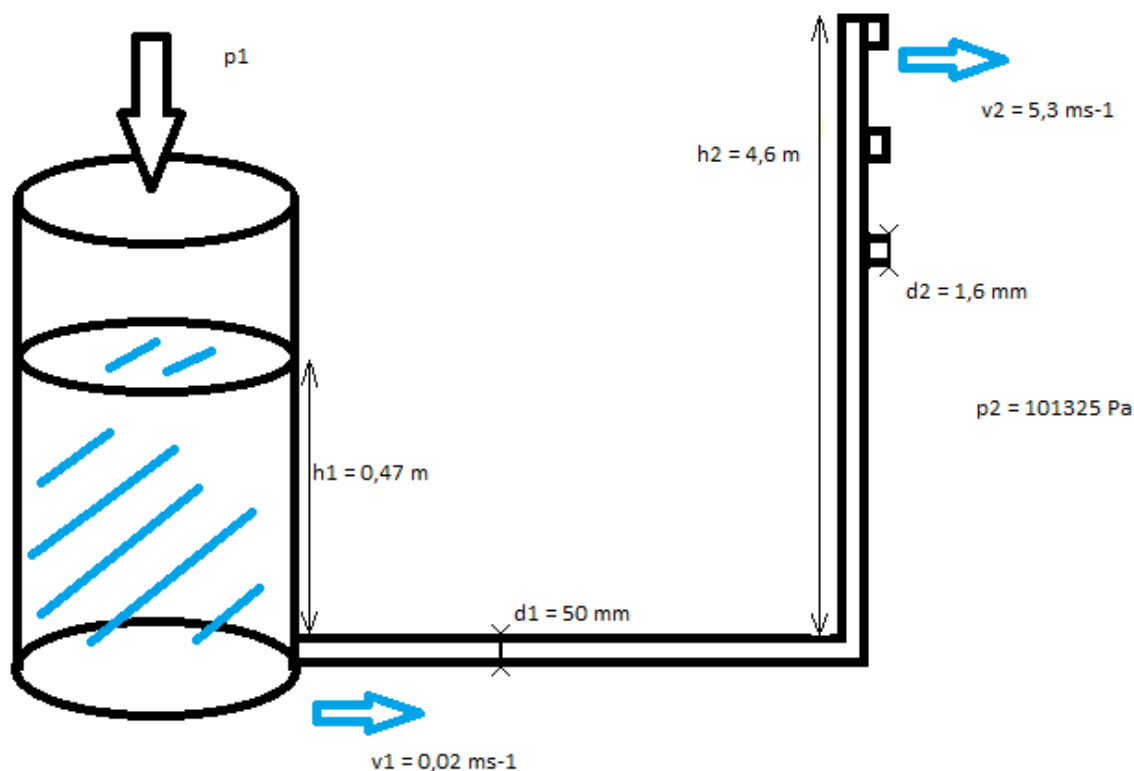
h_2 výška nejvyšší trysky (m)

p_1 potřebný tlak působící na trysky (Pa)

p_2 atmosférický tlak (Pa)

g tíhové zrychlení $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,

náčrt situace lze vidět na obrázku 15.



Obrázek 15: Náčrt situace při výpočtu přetlaku pro trysky

Po vyjádření tlaku a p_1 a výpočtu vychází hodnota potřebného tlaku $p_1 = 156$ hPa. Vlivem poklesu tlaku kvůli ztrátám v tryskách a zmírnění vlivu poklesu hladiny v nádrži doporučuji zvýšit tlak o 5%, tedy přibližně na 164 hPa. Tento přetlak bude zajišťován kompresorem po celou dobu měření, kompresor bude připojen k vrchní části nádrže pomocí hadice. Zapojení celého systému pro vysokonapěťové zkoušky za mokra lze vidět v příloze B, jeho možné umístění v laboratoři vysokých napětí lze najít v příloze C. Při vypočteném tlaku v nádrži bude velikost kapek z trysek dosahovat průměru okolo 3,5 až 4,5 mm, což přibližně odpovídá kapkám skutečného deště.

6. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámit se s problematikou izolátorů, jejich provozních podmínek za nepříznivých situací jako jsou znečištění a déšť, seznámit se s vysokonapětovými zkouškami prováděných na izolátorech za sucha i umělého deště a navrhnout zařízení, které bude realizováno na katedře elektroenergetiky a rozšíří tak zkušební metody laboratoře o vysokonapětové zkoušky izolátorů za mokra až do hladiny napětí 110 kV. Tato práce je rozdělena do čtyř částí, kdy v první části je rozebírána teorie izolátorů, jejich parametry a rozdělení. V druhé části se práce zabývá zašpiněním izolátorů, různými druhy znečištění, měřením míry znečištění a také možnostmi čištění izolátorů. Třetí část je věnována vysokonapětovým zkouškám, které jsou předepsány technickou normou ČSN EN 60060 – 1, kde jsou uvedeny veškeré zkušební postupy pro izolátory a také podmínky pro zkoušky za umělého deště, parametry tohoto umělého deště a zásady dodržované při zkouškách. Z této normy vyplývá, že ačkoliv není přesně definovaný zkušební systém zkoušek za umělého deště a použitá konfigurace trysek a konstrukce přístroje je libovolná, musí tento systém zvládnout izolátor ostříkovat značným množstvím vody, odpovídajícímu silnému dešti, tedy 60 až 120 mm/h (potažmo 1 až 2 mm/min) ve vertikálním i horizontálním směru. Ve čtvrté a poslední části této práce bylo navrženo zkušební zařízení, které umožní dodržet normou předepsané srážky o vydatnosti 65 mm/h ve vertikálním i horizontálním směru. Byl vybrán systém tří trysek s rozstříkem ve tvaru plného kuželu a ústovou rychlostí $5,3 \text{ ms}^{-1}$, který s rezervou splňuje požadavky normy. Množství vody o předepsané vodivosti, která bude potřeba pro zkoušky, vychází na 120 l za hodinu, raději jsme však počítali s jistou rezervou 160 l za hodinu. Tlak, který je nutno vyvinout v nádrži pro správnou funkci trysek, byl stanoven s 5% rezervou přibližně na 164 hPa, což by měl zvládnout běžný kompresor. Vzhledem k použitým materiálům by náklady na realizaci a provoz zařízení neměly být příliš vysoké a značnou výhodou je jeho mobilita a jednoduchá obsluha.

7. POUŽITÁ LITERATURA:

- [1] FARZANEH, M. - CHISHOLM W. Insulators for icing and polluted environments. Hoboken, NJ: J. Wiley, c2009, xxvi, 680 p. ISBN 0470282347
- [2] KUFFEL, E, W ZAENGL a J KUFFEL. *High voltage engineering: fundamentals*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. xiii, 539 p.
- [3] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 2. přepracované vydání Praha; Bratislava: SNTL; ALFA, 1978.
- [4] CHRZAN, Krystian Leonard. *Izolátory se spirálovitou stříškou*. Časopis Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku, číslo 7/2006, ISSN 12100889
- [5] Katalog firmy DRIBO, spol. s r.o., Brno: *Kompozitní izolátory VVN Maclean Power Systems*.
- [6] Stožáry VVN (I). [online], dostupné z:
<http://www.tzb-info.cz/4170-stozary-vvn-i>
- [7] Elektrizační soustavy. [online], dostupné z:
http://www.kdejinde.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/05/soustavy_3.html
- [8] Insulators 101. [online], dostupné z:
<http://ewh.ieee.org/soc/pes/iwg/Publications/Insulators101PanelFinalA.ppt>
- [9] Katalog firmy NANJING ELECTRIC (GROUP) CO., LTD., *Nanjing Insulators: Toughened glass insulators of cap and pin type*, 2010.
- [10] Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie PNE 33 0405-1: *Navrhování venkovní elektrické izolace podle stupně znečištění – Část 1*.
- [11] MATULA: *Simulátor deště pro polní experimenty*, Vodohospodářský Časopis, 32, 1984, č. 2, 217 – 227
- [12] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 9788024815084.
- [13] Technická norma ČSN EN 60060 – 1: *Technika zkoušek vysokým napětím – část 1: obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví 2011
- [14] Technická norma ČSN EN 60060 – 2 ed. 2: *Technika zkoušek vysokým napětím – část 2: Měřicí systémy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví 2011

- [15] Technická norma ČSN EN 60383 – 2: *Izolátory pro venkovní vedení se jmenovitým napětím nad 1000 V. Část 2: Izolátorové řetězce a izolátorové závěsy pro soustavy se střídavým napětím. Definice, zkušební postupy a přejímací kritéria.* Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [16] Výukové materiály k předmětu Vysokonapěťové zkušebnictví od Ing. Radka Procházky, Ph.D.

8. PŘÍLOHY

8.1. Atmosférické korekce

Při každém měření je třeba zaznamenat aktuální atmosférické podmínky, tedy teplotu, tlak a při zkouškách za sucha i vlhkost vzduchu, protože tyto parametry mohou poměrně značně ovlivnit výsledek zkoušek. Měření tlaku se musí provádět přístrojem k tomu určeným, který má rozšířenou nejistotu měření nižší než 2 hPa, měření teploty by mělo probíhat s rozšířenou nejistotou nejvýše 1 °C. Vlhkost lze měřit přímo absolutní, kdy přístroj má mít rozšířenou nejistotu maximálně 1 g/m³, lze ovšem měřit i relativní vlhkost a absolutní vlhkost následně dopočítat.

Před samotným měřením je nutné hodnotu zkušebního napětí vždy přepočítat na referenční atmosféru, jejíž parametry jsou: teplota $t_0 = 20$ °C, tlak $p_0 = 1013$ hPa a absolutní vlhkost $h_0 = 11$ g/m³. Přepočet zkušebního napětí pak probíhá podle vztahu

$$U = U_0 \cdot K_t \quad (8.1)$$

kde je

U zkušební napětí při aktuálních atmosférických podmínkách (kV)

U_0 zkušební napětí odpovídající normalizované referenční atmosféře (kV)

K_t korekční činitel (-).

Vzorec 4.1 platí analogicky i pro přepočet naměřených hodnot napětí, kdy se za naměřenou hodnotu považuje U a za přepočtenou hodnotu U_0 . Korekční činitel zůstává stejný.

Korekční činitel je nutné vypočítat ze vztahu

$$K_t = k_1 \cdot k_2 \quad (8.2)$$

kde

k_1 je korekční činitel na hustotu vzduchu (-) a

k_2 je korekční činitel na vlhkost vzduchu (-).

Vztah 4.2 platí pro zkoušky za sucha, pro zkoušky za mokra se ve vztahu z pochopitelných důvodů vyloučí koeficient k_2 a nahradí se jedničkou.

Výpočet korekčního činitele hustoty vzduchu k_1

Korekční činitel hustoty vzduchu závisí na bezrozměrném parametru δ , který vyjadřuje relativní hustotu vzduchu, a také na bezrozměrném exponentu m , jež závisí na typu předvýbojů. Pak platí

$$k_1 = \delta^m \quad (8.3)$$

a dále

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273 + \theta_0}{273 + \theta} \quad (8.4)$$

kde je

p aktuální atmosférický tlak (hPa)

p_0 tlak za normalizované referenční atmosféry (hPa)

θ aktuální teplota okolí ($^{\circ}\text{C}$)

θ_0 teplota za normalizované referenční atmosféry ($^{\circ}\text{C}$).

Výpočet korekčního činitele vlhkosti vzduchu k_2

Korekční činitel vlhkosti vzduchu závisí na bezrozměrném parametru k , jehož hodnoty závisí na typu použitého zkušební napětím, dále na bezrozměrném exponentu w , závislém na typu předvýbojů, a na poměru absolutní vlhkosti vzduchu h ku relativní hustotě vzduchu δ . Pak platí

$$k_2 = k^w \quad (8.5)$$

kdy pro stejnosměrné napětí platí

$$k = 1 + 0,014 \left(\frac{h}{\delta} - 11 \right) - 0,00022 \left(\frac{h}{\delta} - 11 \right)^2 \quad (8.6)$$

pro střídavé napětí platí

$$k = 1 + 0,012 \left(\frac{h}{\delta} - 11 \right) \quad (8.7)$$

a pro impulzní napětí platí

$$k = 1 + 0,010 \left(\frac{h}{\delta} - 11 \right) \quad (8.8)$$

Rovnice pro impulzní napětí je založena na experimentálním měření při kladném impulzu, lze ji ovšem použít i pro měření při záporném impulzu.

Určení exponentů m a w

Je třeba uvážit závislost korekčního činitele K_t na typu předvýbojů. Abychom mohli korekci správně provést, musíme určit exponenty m a w. K tomu nám pomůže bezrozměrný parametr g, který je dán vztahem

$$g = \frac{U_{50}}{500 \cdot L \cdot \delta \cdot k} \quad (8.9)$$

kde

U_{50} je napětí, kdy s pravděpodobností 50% dojde k průraznému výboji při skutečných atmosférických podmínkách (kV)

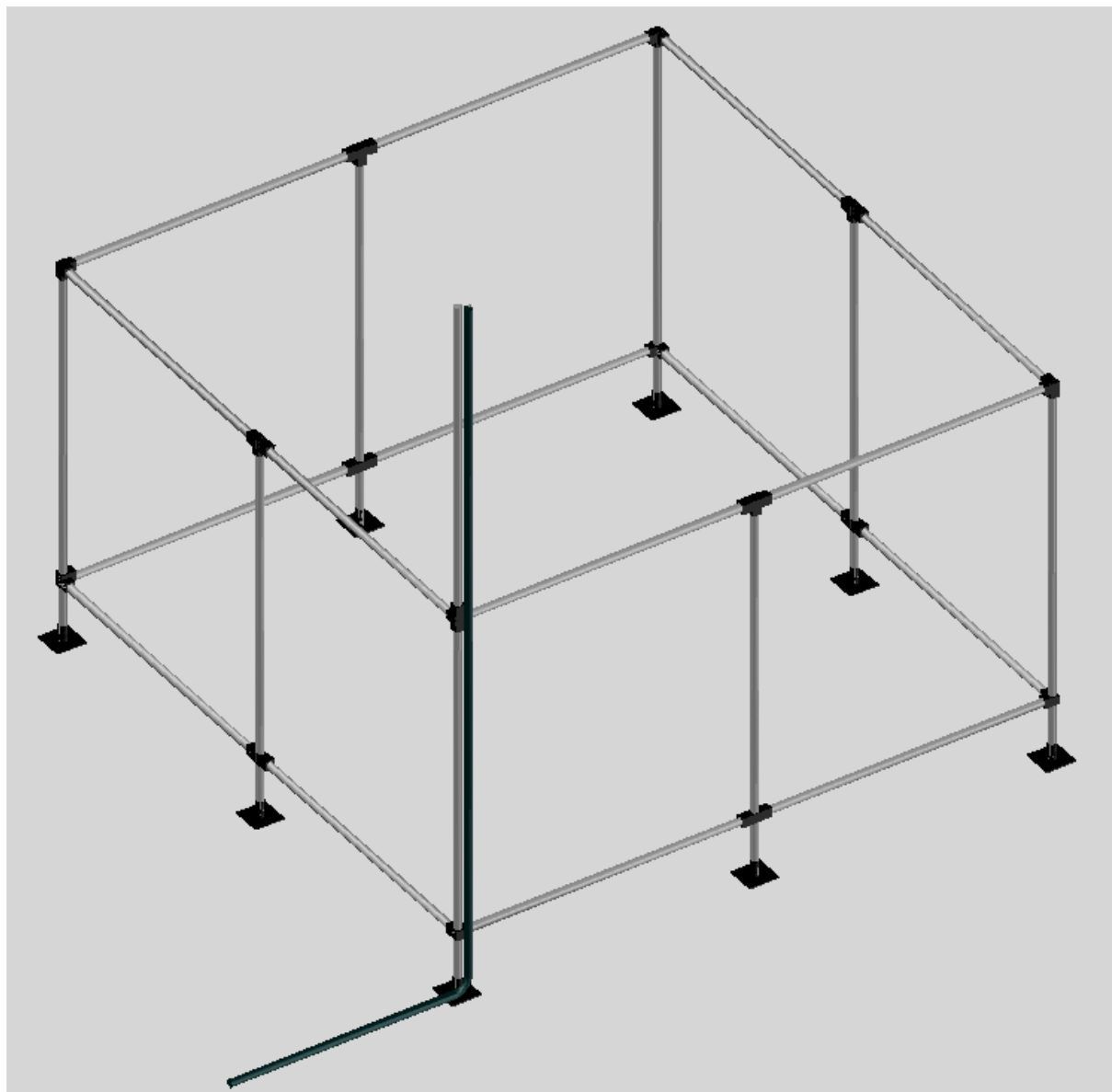
L je minimální dráha výboje (m)

Hodnoty exponentů m a w lze pak snadno vyčíst z tabulky 3.

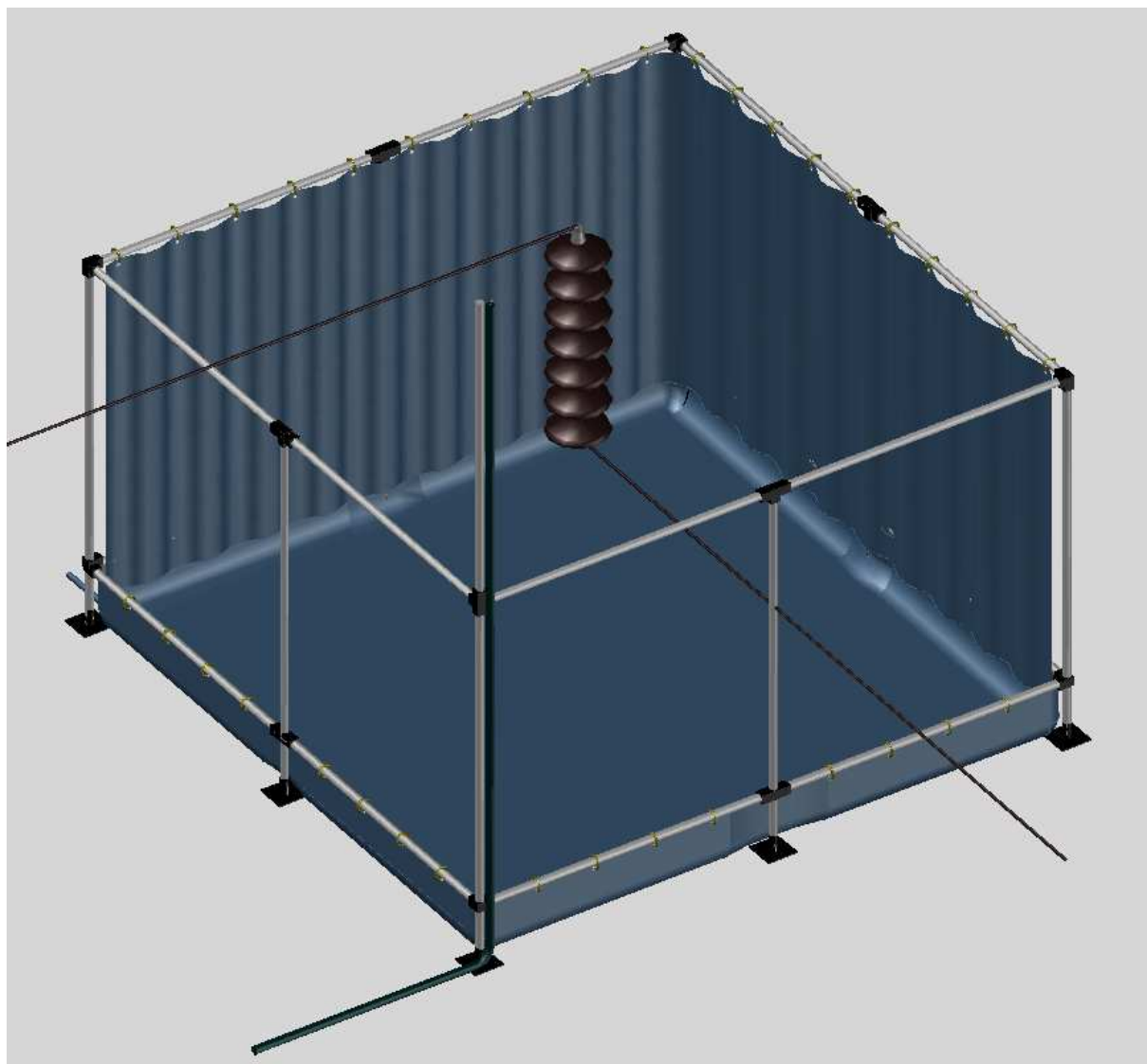
Tabulka 5: hodnoty exponentů m pro korekci na hustotu vzduchu a w pro korekci na vlhkost vzduchu v závislosti na parametru g [11]

g	m	w
<0,2	0	0
0,2 - 1,0	$\frac{g(g - 0,2)}{0,8}$	$\frac{g(g - 0,2)}{0,8}$
1,0 - 1,2	1,0	1,0
1,2 - 2,0	1,0	$\frac{g(2,2 - g)(2,0 - g)}{0,8}$
>2,0	1,0	0

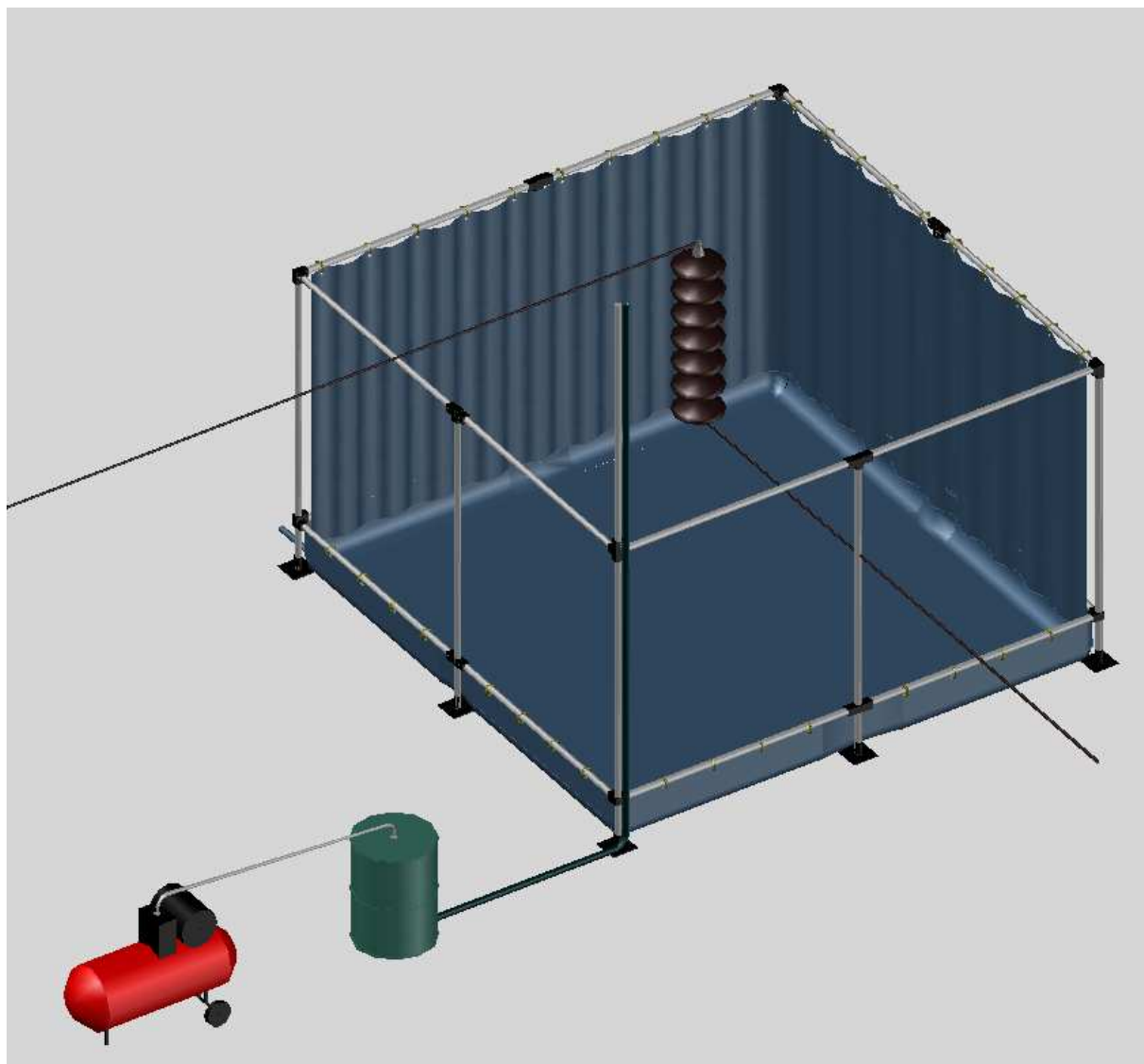
8.2. 3D model zařízení



Obrázek 16: Kostra zařízení bez plachet se spojkami a podstavci + přívodní hadice s tryskami

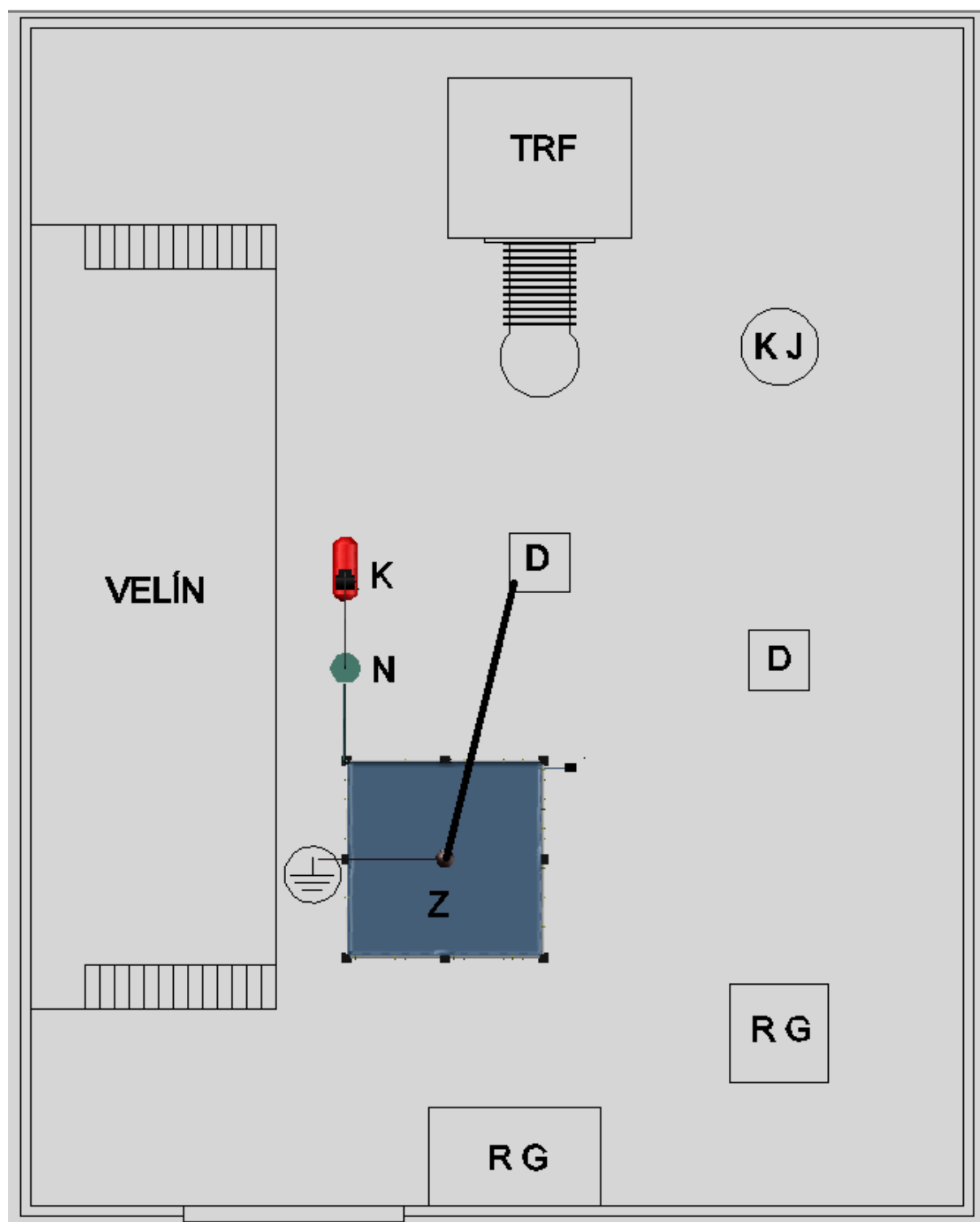


Obrázek 17: Kostra zařízení s oběma plachtami, naznačeným zavěšeným izolátorem a vývody pro vysoké napětí a uzemnění, v levém horním rohu hlavní plachty se nachází výtoková hadice



Obrázek 18: Možná konfigurace zařízení připraveného na zkoušku s kompresorem a nádrží v popředí

8.3. Umístění zařízení v laboratoři vysokých napětí



Obrázek 19: možné umístění zařízení v laboratoři vysokých napětí: TRF – transformátor vysokého napětí, D - dělič, RG - rázový generátor, KJ - kulové jiskřiště, Z - navrhované zařízení, K – kompresor, N - nádrž